

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ
İŞLETME ANABİLİM DALI
İŞLETME PROGRAMI**

**SİMÜLASYON OPTİMİZASYONU İLE DEMONTAJ HATTI
DENGELEME**

Muhammet Enes AKPINAR

**Danışmanlar
Prof. Dr. Hüseyin AKTAŞ
Doç. Dr. Mehmet Ali ILGIN**

MANİSA-2021

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ
İŞLETME ANABİLİM DALI
İŞLETME PROGRAMI**

**SİMÜLASYON OPTİMİZASYONU İLE DEMONTAJ HATTI
DENGELEME**

Muhammet Enes AKPINAR

**Danışmanlar
Prof. Dr. Hüseyin AKTAŞ
Doç. Dr. Mehmet Ali ILGIN**

MANİSA-2021

YEMİN METNİ

Doktora tezi olarak sunduğum “**Simülasyon Optimizasyonu İle Demontaj Hattı Dengeleme**” adlı çalışmanın, tarafımdan bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin bibliyografyada gösterilen eserlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanmış olduğumu belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

04/01/2021

Muhammet Enes AKPINAR

İmza

ÖZET
SİMÜLASYON OPTİMİZASYONU İLE DEMONTEJ HATTI
DENGELEME

Günümüz toplumunda artan çevresel farkındalığı ve daha katı çevresel düzenlemeler, imalat şirketlerini farklı seçenekler (örneğin, geri dönüşüm, yeniden üretim) aracılığıyla kullanım ömrü bitmiş (KÖB) ürünlerinin geri kazanılması için gerekli önlemleri almaya zorlamıştır. Tüm ürün geri kazanım seçenekleri KÖB ürünlerinin belirli seviyelerde demonte edilmesi gerektirdiğinden, demontaj, kullanılmış ürünlerin işleminde kritik bir işlem olarak kabul edilir. Bu kritik operasyon genellikle ürün geri kazanım tesislerinde demontaj hatları oluşturularak gerçekleştirilir. Demontaj hatlarının dengelenmesi için sezgisel, metasezgisel ve matematiksel programlamaya dayalı çeşitli metodolojiler önerilmiştir. Bu metodolojilerin çoğu bir demontaj hattının esas olarak, gelen KÖB ürünlerin bilinmeyen koşullarından dolayı büyük ölçüde belirsizlik içerdiği gerçeğini göz ardı ederek demontaj hattı parametrelerinin belirli olduğunu varsayar. Bu çalışmada, stokastik parametrelerin açık bir şekilde değerlendirilmesi için simülasyon tabanlı bir demontaj hattı dengeleme metodolojisi önerilmiştir. Öncelikle bir demontaj hattının simülasyon modeli oluşturulmuştur. Ardından, demontaj hattını dengelemek için yaygın olarak kullanılan iki metasezgisel (genetik algoritma (GA) ve tavlama benzetimi (TB) simülasyon modeline entegre edilmiştir. GA tarafından önerilen demontaj sırası ve görev atamaları, TB tarafından önerilen sıra ve görev atamaları ile karşılaştırılmıştır.

ABSTRACT
DISASSEMBLY LINE BALANCING BY USING SIMULATION
OPTIMIZATION

Increasing environmental awareness in today's society and stricter environmental regulations have forced manufacturing firms to take necessary actions for the recovery of end-of-life (EOL) products through different options (e.g., recycling, remanufacturing,). Disassembly is regarded as a critical operation in EOL treatment of used products since all product recovery options require the disassembly of EOL products at certain levels. This critical operation is generally carried out by forming disassembly lines in product recovery facilities. Miscellaneous methodologies based on heuristics, metaheuristics and mathematical programming have been proposed for the balancing of disassembly lines. Majority of those methodologies assume that disassembly line parameters are deterministic by ignoring the fact that a disassembly line involves great deal of uncertainty mainly due to uncertain conditions of arriving EOL products. In this study, a simulation-based disassembly line balancing methodology is proposed for the explicit consideration of stochastic parameters. First, simulation model of a disassembly line is constructed. Then two commonly used metaheuristics (i.e., genetic algorithms (GAs) and simulated annealing (SA)) are integrated with the simulation model in order to balance the disassembly line. The disassembly sequence and task assignments proposed by GA are compared with the sequence and task assignments proposed by SA.

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Hüseyin AKTAŞ ve Sayın Doç. Dr. Mehmet Ali ILGIN'a, bilgi ve tecrübesi ile doktora hayatımın tüm zorlu aşamalarında her yönden yardımcı olan, tecrübeleri ile beni aydınlatan ve desteğini hiç eksik etmeyen, kendilerini tanımaktan büyük onur duyduğum hocalarım Sayın Doç. Dr. Çiğdem SOFYALIOĞLU ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özgür ESKİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, kendimi geliştirmem için beni sürekli okumaya teşvik eden, maddi ve manevi güçlerini hiçbir zaman esirgemeyen, değerli annem ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ve tanıştığımız günden bugüne kadar, iyi ve kötü günde, yoğun çalışmalarımlarım esnasındaki anlayışı ve gücünü her daim yanımda hissettiğim değerli eşime de teşekkürü bir borç bilirim.

Muhammet Enes AKPINAR
Manisa, 2021

İÇİNDEKİLER

TEZ SAVUNMA SINAV TUTANAĞI	II
YEMİN METNİ.....	III
ÖZET.....	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR.....	VI
İÇİNDEKİLER	VII
KISALTMALAR	IX
TABLolar LİSTESİ.....	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	XI
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

DEMONTAJHATTI Dengeleme

1.1. DEMONTAJ HATTI Dengeleme.....	4
1.2. GERİ KAZANIM SÜREÇLERİNDE DEMONTAJ	7
1.2.1. Tamir.....	8
1.2.2. Yenileme	8
1.2.3. Yeniden Üretim.....	8
1.2.4. Parça Kazanımı	9
1.2.5. Geri Dönüşüm.....	9
1.3. LİTERATÜR TARAMASI.....	10
1.3.1. Sezgisel Yöntemler	10
1.3.2. Metasezgisel Yöntemler.....	12
1.3.3. Matematiksel Modeller	17

İKİNCİ BÖLÜM

SİMÜLASYON OPTİMİZASYONU

2.1. SİMÜLASYON OPTİMİZASYONU.....	21
2.2. SİMÜLASYON OPTİMİZASYONUNDA KLASİK YAKLAŞIMLAR	21
2.3. SİMÜLASYON OPTİMİZASYONUNDA META-SEZGİSEL YAKLAŞIMLAR.....	22
2.3.1. Genetik Algoritma	23
2.3.1.1.Kodlama.....	26
2.3.1.2.Başlangıç Popülasyonu	26
2.3.1.3. Uygunluk Fonksiyonu.....	27
2.3.1.4.Genetik Operatörler	27
2.3.1.5.Sonlandırma Kriteri	29

2.3.2. Genetik Algoritma ile Simülasyon Optimizasyonunun Kullanımı	29
2.3.3. Tavlama Benzetimi	33
2.3.3.1. Başlangıç Sıcaklığı.....	36
2.3.3.2. Soğuma Oranı	36
2.3.3.3. Durdurma Kriteri	37
2.3.4. Tavlama Benzetimi ile Simülasyon Optimizasyonunun Kullanımı.....	38

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

SİMÜLASYON OPTİMİZASYONU İLE DEMONTAJ HATTI DENGELEME

3.1. PROBLEMİN TANIMI.	40
3.2. SİMÜLASYON MODELİNİN TASARIMI	43
3.3. GENETİK ALGORİTMANIN TASARIMI.....	46
3.3.1. Kromozom Gösterimi	46
3.3.2. Başlangıç Polülasyonu	46
3.3.3. Genetik Operatörler	47
3.3.3.1. Seçim.....	47
3.3.3.2. Çaprazlama	48
3.3.3.3. Mutasyon.....	48
3.3.4. Uygunluk Fonksiyonu.....	48
3.3.5. Tam Faktör Analizi ile Genetik Algoritma Parametrelerinin Analizi.....	51
3.4. TAVLAMA BENZETİMİ TASARIMI.....	52
3.4.1. Tam Faktör Analizi ile Tavlama Benzetimi Parametrelerinin Analizi	53
SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKÇA	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

DHDP	Demontaj Hattı Dengeleme Problemi
GA	Genetik Algoritma
TB	Tavlama Benzetimi
AHS	Analitik Hiyerarşi Süreci
BAHS	Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci
İKKO	İşbirlikçi Karınca Koloni Optimizasyonu
ÇAKKO	Çok Amaçlı Karınca Kolonisi Optimizasyonu
SBDHDP	Sıra Bazlı Demontaj Hattı Dengeleme Problemi
DKA	Değişken Komşuluk Araştırması
BDHDP	Bulanık Demontaj Hattı Dengeleme Problemini
DHBG	Demontaj Hiyerarşi Bilgisi Grafiğini
ÜBS	Üçgen Bulanık Sayılar
ÇABDHDP	Çok Amaçlı Bulanık Demontaj Hattı Dengeleme Probleminin
YBSA	Yapay Balık Sürüsü Algoritması
GÇADAA	Geliştirilmiş Çok Amaçlı Ayrık Arılar Algoritması
TTZ	Tersine Tedarik Zinciri
PDHDP	Paralel Demontaj Hattı Dengeleme Problemini
YAA	Yerçekimi Arama Algoritmasına
KTDP	Karma Tamsayı Doğrusal Programlama
YBS	Yapay Bağışıklık Sistemlerine
HPSO	Hibrit Parçacık Sürü Optimizasyonu

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Montaj ve demontaj sistemlerinin farkı

Tablo 2. Geri kazanım alternatiflerinin karşılaştırılması

Tablo 3. Kombi parçalarının karakteristik özelliği

Tablo 4. Demontaj işleminin karakteristik özelliği

Tablo 5. Genetik algoritma faktör seviyeleri

Tablo 6. Tavlama benzetimi parametrelerinin faktör seviyeleri

Tablo 7. Genetik algoritma parametre değerleri

Tablo 8. Genetik algoritma ile parçaların atanması

Tablo 9. Tavlama benzetimi parametre değerleri

Tablo 10. Tavlama benzetimi sonucuna göre parçaların atanması

Tablo 11. Genetik algoritma ve tavlama benzetimi algoritmaları için uygunluk fonksiyon değerlerinin kıyaslanması

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Alternatif demontaj şekilleri

Şekil 2. Genetik Algoritma akış diyagramı

Şekil 3. İkili kromozom gösterimi

Şekil 4. Tek nokta çaprazlama

Şekil 5. Tek noktalı mutasyon

Şekil 6. Katı bir cisim için ısıl işlem süreci

Şekil 7. Tavlama Benzetimi Akış Diyagramı

Şekil 8. Kombi demontajı için öncelik ilişkileri

Şekil 9. Kombi demontaj işleminin simülasyon akışı

Şekil 10. Genetik algoritma akış diyagramı

Şekil 11. Kromozomun yapısı

Şekil 12. Genetik algoritma parametrelerinin MINITAB ile analizi

Şekil 13. Tavlama benzetimi akış diyagramı

Şekil 14. Tavlama benzetimi parametrelerinin MINITAB ile analizi

Şekil 15. Genetik Algoritmanın çevrim süresine göre yakınsama grafiği

Şekil 16. Genetik Algoritma kromozom gösterimi

Şekil 17. Tavlama benzetimi çevrim süresine göre yakınsama grafiği

Şekil 18. Tavlama benzetimi kromozom gösterimi

GİRİŞ

Ürünlerin kullanım ömrünün bitmesiyle birlikte artan atık miktarlarına dikkat edilmesi son zamanlarda gerek hükümetler, gerek çevre faktörleri ve gerekse de üreticiler için bir zorunluluk haline gelmiştir. Bundan dolayı artık üreticiler, kullanım sonrası ürünlerini giderek daha fazla geri dönüştürmekte ve işlemektedirler. Özellikle son yıllarda artan kamuoyu farkındalığı, daha katı çevre mevzuatı ve hükümet düzenlemeleriyle birlikte ürün geri kazanım sürecinin ve çevreye duyarlı üretim kavramlarının önemi ön plana çıkmıştır.

Çevreye duyarlı üretim kavramı, ürünlerin tasarım aşamasından başlayarak dağıtım aşamasına ve sonrasında da kullanım ömrünü bitirmiş ürünlerin yok edilmesi aşamasına kadarki olan aşamalarda çevre standartlarını ve gereksinimlerini karşılayacak üretim yöntemlerinin geliştirilmesidir. Geri kazanım süreci ise, eski veya artık günün şartlarına uymayan ürünlerden elde edilen malzemelerin ve parçaların geri dönüşüm ve yeniden üretim faaliyetleriyle birlikte geri kazanılması ve dolayısıyla atık miktarlarının azaltılması şeklinde tanımlanabilir (Güngör ve Gupta, 1999).

Ürün geri kazanımda ürünleri, alt montajları veya parçaları elden çıkarmak yerine yeniden kullanmak ekonomik açıdan daha cazibeli. Ürün yaşam döngüsünde ömrünü tamamlamış bu ürünler için yeniden kullanım, yeniden üretim, geri dönüşüm, depolama ve elden çıkarma işlemleri yapılabilir.

Bu kavramlardan;

- *Yeniden kullanım*, ürünlere herhangi bir işlem yapmadan ve ürünün şeklini koruyarak ekonomik ömür bitene kadar tekraren kullanılmasıdır.
- *Yeniden üretim* bir ürünün, kullanılmış, tamir edilmiş ve yeni parçalar kullanılarak orijinal ürünün özelliklerine göre yeniden yapılmasıdır.
- *Geri dönüşüm*, kullanım dışı kalmış geri dönüşüme uygun atık malzemelerin çeşitli yöntemler ile ham madde olarak tekrar imalat süreçlerine kazandırılmasıdır.

- *Depolama*, ürünlerin demontaj işlemi sonrası stoğa alınması ve elden çıkarma da kullanıma uygun olmayan ürünlerin sistemden çıkarılması olarak tanımlanabilir.
- Bunlar dışında ise son durumda demontaj işlemi dikkate alınabilir. Demontaj işleminde ürün alt bileşenlerine ayrılır ve talep durumuna ve kullanım durumuna göre stoklanabilir. Bununla birlikte, demontaj emek yoğun bir iş olduğu için maliyetlidir ve demontaj işleminin mümkün olduğu kadar verimli olması gerekir.

Demontaj, bir ürünü tamamlayıcı parçalarına, bileşenlerine, alt montajlarına veya diğer gruplarına ayırmak için sistematik bir yöntem olarak tanımlanabilir. Demontaj işlemleri tek bir iş istasyonunda, bir demontaj hattında veya bir demontaj hücresinde gerçekleştirilebilirken, en yüksek verim ve üretkenlik demontaj hattı tarafından sağlanır. Literatürdeki demontaj işlemlerinde ve hatlarında ortaya çıkan birkaç alt problem vardır. Bunlar; demontaj planlaması, demontaj çizelgeleme, demontaj sıralama ve demontaj hattı dengeleme şeklindedir (Lee vd., 2001).

Bu kavramlardan;

- *Demontaj planlaması*, demontaj seviyesi ve kullanım ömrü seçenekleri ile ilgili ürün gösterimini ve ilgili ürün tasarımı/ürünün yeniden tasarımı konularını içerir.
- *Demontaj çizelgelemesi*, kullanılmış ürünün sipariş miktarını, sökülmüş parça ve alt montaj taleplerini tam olarak belirlemek için çizelgeleme işleminin yapılmasıdır (Lee ve Xirouchakis 2007).
- *Demontaj sırası*, demontaj görevlerinin işlendiği uygun / optimal bir düzen arar (Lambert, 2003).
- *Demontaj hattı dengeleme* ise yukarıda bahsedilen alt problemler arasında en ön sırada yer alan, tüm öncelik ilişkilerinin yerine getirilmesi ve bir miktar etkinlik ölçüsünün optimize edilmesi için demontaj görevlerinin iş istasyonlarına atanması şeklinde tanımlanabilir.

Gerekli iş istasyonu sayısını ve kullanımı biten ürünlerinin demontaj hattındaki demonte sırasını içeren sorunları çözmek için bazı teknikler

gerekmektedir. Buradaki zorluk, demontajın benzersiz özelliklere sahip olması gerçeğinde yatmaktadır. Montaj ile bazı benzerlikleri olsa da, demontaj süreci montaj işleminin tersi değildir. Demontaj hattındaki parçaların demonte sırası veya iş istasyonu seçim çözümlerini elde etmedeki zorluk, herhangi bir çözüm sırasındaki sayıların bir permütasyonundan oluşmasından kaynaklanmaktadır. Bu permütasyon, ürünlerdeki parçalar kadar karmaşıklık içerir ve bu nedenle demontaj işlemleri daha karmaşık hale gelebilir. Buradan hareketle ortaya çıkan bu zorlukların çözümü için Demontaj Hattı Dengeleme Problemi (DHDP) kavramı ortaya çıkmıştır. DHDP, sistematik bir şekilde istasyonlara iş ataması yaparken işler arasında bulunan öncelik ilişkilerinin dikkate alınması ve bir performans ölçütünün optimize edilmesi şeklinde tanımlanabilir (Güngör ve Gupta, 1999).

DHDP ile ilgili yapılan çalışmalarda, iş istasyonlarının sayısını en aza indirmek gibi amaçlara ek olarak, zararlı bileşenlerin ve talebi yüksek parçaların önce demontajını yapmak ve demontaj yönü değişikliklerini en aza indirmek gibi birden çok amaç dikkate alınmaktadır (McGovern ve Gupta, 2007). Dolayısıyla DHDP bir NP-zor problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, DHDP nispeten yeni bir problem alanıdır ve ilk olarak 2002 yılında çalışılmıştır (Güngör ve Gupta, 2002).

Bu çalışmada DHDP'nin çözümünde kullanılan metasezgisel yöntemler ile birlikte simülasyon optimizasyonu tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Önerilen bu yöntem ile bir kombi demontaj hattında öncelikle Genetik Algoritma (GA) yardımıyla performans ölçütleri çözülmüştür. Sonrasında ise tavlama benzetimi ile çözümlenerek sonuçlar kıyaslanmıştır. DHDP ile simülasyon optimizasyonunun birlikte kullanılması bakımından bu çalışma literatürdeki ilk çalışma niteliğindedir.

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde DHDP ve DHDP literatüründe bulunan çalışmalara ve çözüm yöntemlerine (sezgisel algoritmalar, metasezgisel algoritmalar ve matematiksel modeller) değinilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde simülasyon optimizasyonu ve çalışma kapsamında kullanılan GA ve tavlama benzetiminden bahsedilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde simülasyon optimizasyonu ile demontaj hattı dengeleme çalışmasının detayları aktarılmıştır. Son olarak sonuç ve öneriler ile çalışma sonlandırılmıştır.

BİRİNCİ BÖLÜM

DEMONTAJ HATTI DENGELEME

1.1.DEMONTAJ HATTI DENGELEME

Genel bir ürün geri kazanım sisteminde ömrü tükenen ürünler, bazı durumlarda oluşabilecek belirli bir talebi karşılamak üzere son kullanıcılardan geri alınabilir. Geri alma işleminden sonra, kullanım ömrü sona eren ürünler bir ürün geri kazanım tesisine gönderilir. Sonrasında burada ayırma işlemi yapılır, temizlenir ve daha sonraki işlemler için hazır hale getirilir. Ürünler daha sonra sökülecekleri bir demontaj tesisine gönderilir. Yeniden kullanım için talep edilen ve depolanacak ürünler, tahribatsız demontaj (*nondestructive disassembly*) işlemi kullanılarak demonte edilir. Geri dönüşüm için talep edilen veya bertaraf edilen diğer öğeler, yıkıcı demontaj (*destructive disassembly*) yöntemiyle potansiyel olarak parçalarına ayrılır.

Demontaj işlemi, ürün geri kazanım işlemlerinin en önemli öğelerinden biridir. Ürün geri kazanım işlemlerinde ana seçenekler yeniden kullanım, yeniden üretim, geri dönüşüm, depolama ve uygun bertaraftır. Genellikle, ömrünü tamamlamış ürün, herhangi bir ürün kurtarma seçeneği seçilmeden önce demonte edilmelidir.

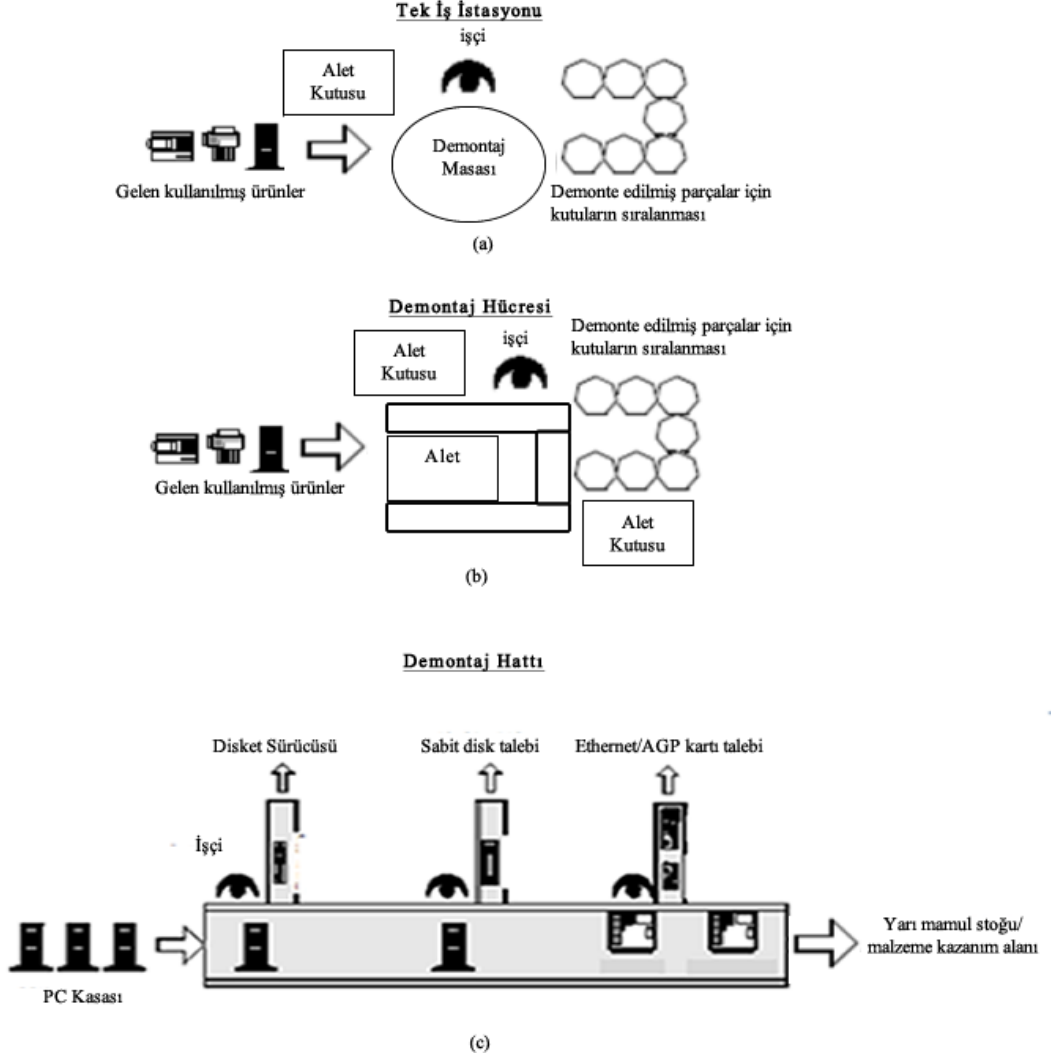
Literatürde montaj hattı ve demontaj hattı ile ilgili bazı benzerlikler olsa da birçok parametrede farklılıklar içermektedir. Öncelikle tanımlara bakacak olursak montaj hattı, bir ürünü monte etmenin en verimli yolu olduğu gibi, demontaj işlemi için de bir ürünü demonte etmenin en verimli yolu olduğunu söyleyebiliriz. Diğer bir ifadeyle demontaj işlemini, bir ürünü oluşturan parçalardan sistematik bir yapıda birbirinden ayrılması işlemi olarak tanımlayabiliriz. Demontaj hattı ise, demontaj işleminin uygulama aşamasını kolaylaştırıcı şekilde ve ürünlerin karakteristiğine bağlı olacak şekilde oluşturulmalıdır. Demontaj işleminde demonte edilecek parçalar arasında öncelik ilişkileri mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Bununla birlikte demontaj işleminde bir parçayı demonte edebilmek için o işin öncülü varsa o işler de tamamlanmış olmalıdır. Demontaj hattı ve Montaj hattı arasındaki farklar Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Montaj ve Demontaj Hatlarının Farkı (Brennan vd., 1994)

Hat Özellikleri	Montaj Hattı	Demontaj Hattı
Talep	Bağımlı	Bağımlı
Talep Kaynakları	Tekli	Çoklu
Çoklu Ürün	Evet	Evet
Talep Gelişi	Bitmiş ürüne	Parçalara
Öncelik İlişkileri	Evet	Evet
Öncelik İlişkilerindeki Karmaşıklık	Düşük	Yüksek
Performans ölçütlerindeki karmaşıklık	Orta	Yüksek
Ürünlerin kalitesindeki belirsizlik	Düşük	Yüksek
Ürünlerin miktarındaki belirsizlik	Düşük	Yüksek
Hat esnekliği	Orta	Düşük
Düzen alternatifleri	Çoklu	Çoklu
Tahmin gereklilikleri	Tek ürün	Çoklu ürün
Planlama	Ürüne göre	Tanımsız
Tasarım	Montaja göre	Demontaja göre
Tesis ve Kapasite Planlama	Basit	Karışık
Üretim sistemi	Dinamik	Dinamik
Operasyonun karmaşıklığı	Orta	Yüksek
Malzeme akış yönü	İleriye doğru	Geriye doğru
Problem karmaşıklığı	NP-zor	NP-zor

Demontaj hattı literatürüne bakıldığında alternatif demontaj şekilleri ortaya çıkmaktadır (Şekil 1). Bunlar; tek iş istasyonu, demontaj hücresi ve demontaj hattı şeklindedir. Bunlardan tek iş istasyonunun avantajı çok esnek olmasıdır. Dezavantajı ise yüksek hazırlık zamanı gerektirmesi ve düşük üretkenlik oranının olmasıdır. Demontaj hücresinde ise çok esneklik aynı şekilde bir avantajdır ancak yüksek başlangıç, hazırlık/operasyon maliyetinin olması ve orta üretkenlik oranının olması dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Son olarak demontaj hattı otomasyon için uygun olması ve yüksek üretkenlik oranının olması avantajken daha az esnek olması dezavantaj olarak söylenebilir.

Bir demontaj hattının, ürün geri kazanım işlemine özgü ve montajda bulunmayan başka durumları vardır. Ürün geri kazanım sisteminin benzersiz bir amacı da, yeniden kullanım, geri dönüşüm, depolama ve imha için demonte edilecek parçaların talebi karşılaması amacıyla son kullanıcılardan alınacak kullanım ömrü biten ürün sayısının belirlenmesidir.



Şekil 1. Alternatif demontaj şekilleri (a) Tek iş istasyonu (b) Demontaj hücresi (c) Demontaj hattı (Güngör ve Gupta, 2001)

Demontaj işlemleri genellikle sistemin belirsizliğini arttıran işlemlerdir. Bunun nedeni, kullanım ömrü dolmuş ürünlerin çoğunun kullanım ömürleri boyunca değişen koşullara maruz kalmasıdır. Örneğin, ürün yapısındaki bazı parçalar kırılmış ve / veya diğer parçalar ile değiştirilmiş olabilir veya ürünün şekli planlanan demontaj işlemini engelleyecek şekilde değiştirilmiş olabilir.

Demontaj hattı dengelemede ise demontaj sürecindeki birçok performans ölçütü dikkate alınabilir. Bu performans ölçütleri literatürde genellikle aşağıdaki şekilde dikkate alınmıştır;

1. Demontaj iş istasyonu sayısının en aza indirilmesi
2. Demontaj sırasında en tehlikeli parçaların en önce demonte edilmesi

3. Yüksek talep gelen ürünlerin düşük talep gelen ürünlerden önce demonte edilmesi
4. Demontaj esnasında en az yön değiştirme ile demontaj işleminin yapılması

1.2. GERİ KAZANIM SÜREÇLERİNDE DEMONTAJ

Bu bölümde geri kazanım süreçlerinde demontajın kullanım fonksiyonları hakkında bilgi verilmiştir.

Çevreye duyarlı imalat ve ürün geri kazanımı, öncelikle hükümet düzenlemeleri ve çevre konularına ilişkin birey ile toplumun kendisi için bir zorunluluk haline gelmiştir. Çevreye duyarlı üretim ve geri kazanım sistemleri, malzemelerin/ürünlerin yeniden kullanımını sağlayarak endüstrinin çevre üzerindeki etkisini ve kullanılan enerji ile birlikte kaynak miktarını azaltmayı amaçlar. Şirketler bu süreçte çevreye daha duyarlı olmalı, sürdürülebilir uygulamalara ve malzemelere odaklanmalı ve sosyal sorumluluk sahibi şirketler haline gelmelidir. Mevcut üretim faaliyetleri çevrenin bozulmasına, kaynakların hızlandırılmış bir oranda tükenmesine, küresel ısınmaya neden olmuştur. Yeni teknolojiler, ürünlerin kısa yaşam döngüsü sebebiyle sürdürülebilirliklerini kalıcı kılmak için daha fazla kaynak tüketmek durumunda kalmışlardır. Bu nedenle şirketler, sadece rekabet gücünü artırmak için değil, faaliyetlerinin çevre üzerindeki etkisini de sosyal olarak sorumlu bir şekilde değerlendirmek için üretim faaliyetlerini dönüştürmek zorundadır. Çevreye duyarlı üretim uygulandığında çevresel zorunluluğa hitap etmekte ve kaynakların tükenmesini yönetmenin farklı yollarını sunmaktadır. Çevreye duyarlı üretim uygulamalarının ve çevre üzerindeki etkilerinin anlaşılmasını artırmak, şirketlerin üretim stratejilerini geliştirmelerini sağlayacaktır.

Geleneksel üretim sistemleri ürünün son kullanıcıya satılması ile elde edilen karın arttırılmasına odaklanmıştır. Ancak son yıllarda bu anlayış, ürünlere ait farklı hayat çevrimlerini, yani mühendislik, servis, bakım, montaj ve kullanım ömrünü tamamlamış ürün süreçlerini de dahil ederek ürünlerin değer ve kazançlarını eniyileme yönünde değişiklik göstermiştir (Duflou vd., 2008). Bu yeni amaçlar, çevresel etkilerin azaltılması ve ürün hayat çevrimindeki kısıtlamaların yerine getirilmesini içermektedir. Dolayısıyla, satıştan öte fonksiyonellik sağlamak hedeflenmektedir (Duflou vd., 2008). Bu tip çevreye duyarlı sistemlerde ürün son

kullanıcıdan geri dönerek tekrar tersine tedarik zinciri içerisinde hareket etmektedir (Thierry vd., 1995; Jayaraman, 2006). Kerrve ve Ryan (2001)'e göre sürdürülebilir üretim ve tüketim yalnızca kapalı çevrimli sistemlerde mümkündür. Üreticiye geri dönen kullanım ömrünü tamamlamış ürünler için farklı kazanım stratejileri ve bertaraf seçenekleri uygulanabilir (Jayaraman, 2006).

Kullanım ömrünü tamamlamış ürün, yeterli kalite düzeyine sahip ise kullanılmış ürün olarak satılabileceği gibi, yakılarak ya da atık alanlarında depolanarak bertaraf edilebilir. Tamir, yenileme, yeniden üretim, parça sökümü ve geri dönüşüm ise geri kazanım süreçlerinde uygulanabilir faaliyetlerdir. Geri kazanım alternatiflerinin özellikleri ve aralarındaki farklar Tablo 2'de verilmiştir. Bu alternatifler süreçlerde ihtiyaç duyulan demontaj seviyesine göre sıralanmıştır.

1.2.1. Tamir

Tamir, arızalı parçaların düzeltilmesini ve değiştirilmesini içerir. Tamir işlemleri müşterinin bulunduğu yerde veya üretici tarafından kontrol edilen bir onarım merkezinde gerçekleştirilebilir. Genellikle tamir edilen ürünün kalitesi yeni ürününün kalitesine göre düşüktür. Tamirde genellikle sınırlı düzeyde parça demontajı ve yeniden montaja gereksinim duyulur (Thierry vd., 1995).

1.2.2. Yenileme

Yenileme işleminde ürün kimliğini kaybetmez ve belirli bir kalite düzeyine geri getirilir. Bazen yenileme, eski modülleri ve parçaları teknolojik olarak daha üstün olanlarla değiştirerek teknoloji yükseltmesi ile birleştirilir.

1.2.3. Yeniden Üretim

Yeniden üretim, yıpranmış ürünlerin benzer yeni koşullara getirildiği endüstriyel bir süreçtir. Böylece yeniden üretim, kullanılmış parçalarla yeni ürünlerin kalite standartlarını sağlar. Yeniden üretimde ürün, demonte edileceği, yeniden üretileceği ve yeniden perakende bir ürün olarak perakende çıkışından tüketiciye geri gitmesi için yeniden monte edileceği imalat aşamasında ters kanala girecektir. Bu iki şekilde olabilir: ürün kimliğini koruyabilir (örneğin bir uçak motoru için) veya tamamen yeni bir ürün kısmen eski parçalardan yapılabilir. Yeniden üretimin amacı, kullanılmış ürünleri yeni ürünler için olduğu kadar titiz kalite standartlarına getirmektir.

Tablo 2. Geri kazanım alternatiflerinin karşılaştırılması (Thierry vd., 1995)

	Demontaj düzeyi	Kalite Gereksinimleri	Son ürün
Tamir	Ürün düzeyinde	Ürünü çalışma düzeninde yenileme	Bazı parçalar onarılmakta ya da yedekleri ile değiştirilmekte
Yenileme	Modül düzeyinde	Tüm kritik modüllerin kontrolü ve belirlenen kalite düzeyine yükseltme	Bazı modüller tamir edilmekte/değiştirilmekte; geliştirilmekte
Yeniden üretim	Parça düzeyinde	Tüm modül ve parçaların kontrolü ve yeni ürün ile eş standartlara yükseltme	Kullanılmış ve yeni modüller/parçalar ile yeni ürün elde edilmekte, geliştirilmekte
Parça kazanımı	Belirli parçaların geri kazanımı	Parçaların yeniden kullanılacakları sürece bağlıdır.	Bazı parçalar yeniden kullanılır, kalan ürün geri dönüştürülür ya da bertaraf edilir.
Geri dönüşüm	Malzeme düzeyinde	Orijinal parçaların üretimi için yüksek, diğerleri için düşük	Yeni parçalar üretmek için malzemeler yeniden kullanılmakta

1.2.4. Parça Kazanımı

Parça kazanımında amaç demontaj yapılan ürünlerden sadece küçük bir oranı yeniden geri kazanabilmektir. Bu parçalar diğer parça ya da bileşenlerin tamir, yenileme ya da yeniden üretimlerinde kullanılmaktadır. Demonte edilen parçaların kalite standartları yeniden kullanılacakları sürece göre değişiklik göstermektedir. Parça kazanımı geri dönen ürünlerin belirli parçalarının demontajını ve kullanılabilir parçaların kontrolünü içerir (Thierry vd., 1995).

1.2.5. Geri Dönüşüm

Geri dönüşüm, kullanılmış ve çalışmayan ürünlerin malzeme içeriğini almak için yapılan bir işlemdir. Burada ilk işlemde sonra işlenmemiş malzemeleri üretmek için diğer hammaddelerle birlikte bu ürünler yeniden kullanılabilir. Geri dönüşüm sürecinde, ürünlerin ve bileşenlerin kimliği ve işlevselliği yok olur. Geri dönüşüm işleminin temel amacı, kullanılan bileşenlerden ve ürünlerden malzemeleri yeniden kullanmaktır.

1.3. LİTERATÜR TARAMASI

DHDP'nin en basit versiyonu Güngör ve Gupta (2001) tarafından açıklanan tek ürünlü ve düz DHDP'dir. Bu ilk çalışmada amaç, hata etkilerini en küçükleyecek şekilde işleri istasyonlara atamaktır. Bu çalışmanın ortaya çıktığı zamandan bugüne kadar demontaj hattı dengeleme alanında birçok araştırma yapılmış ve yapılan bu araştırmalar yenilerine de ilham kaynağı olmuştur ve olmaya devam etmektedir. Çalışmanın bu bölümünde, DHDP ile ilgili literatürde bulunan çalışmalara değinilmiştir. Literatür araştırması sonucunda üç temel çözüm yönteminin olduğu görülmüştür. Bunlar; sezgisel yöntemler, metasezgisel yöntemler ve matematiksel modellerdir.

1.3.1. Sezgisel Yöntemler

Güngör ve Gupta (2001) iş hataları ile ilgili problemlerin dikkate alındığı koşullarda DHDP'ni ele almışlardır. Çalışmada amaç, demontaj hattındaki kusurlu parçaların etkisini minimize edecek şekilde işlerin iş istasyonlarına atanmasıdır ve çözüm yöntemi olarak sezgisel bir algoritma kullanılmıştır.

Güngör ve Gupta (2002) yaptıkları çalışmada demontaj hatlarında ortaya çıkan karmaşıklıkları ve bu karmaşıklıkların hatta olan etkisini açıklamışlardır. Basit demontaj hattı dengeleme problemi ele alınmış ve geri dönen parçaların talebini karşılayacak şekilde hattaki istasyon sayısının minimize edilmesi amaçlanmıştır.

Avikal ve Mishra (2012) parçaların U şeklindeki bir demontaj hattından iş istasyonlarına öncelik ilişkileri dikkate alınarak atanması için yeni bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Önerilen sezgiselin iyi performans gösterip göstermediğini görmek için sonuçları diğer çözümlerle karşılaştırmışlardır. Çalışmada amaç tehlikeli, yüksek talebe ve düşük demontaj maliyetine sahip bileşenleri dikkate alarak minimum iş istasyonu sayısını elde etmektir. Sonuçlar, önerilen yöntemin diğer yöntemlere nazaran belirgin şekilde daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir.

Aydemir vd. (2013) stokastik bir DHDP'nin çok amaçlı optimizasyonunu ele almış ve bu çok amaçlı optimizasyon problemini çözmek için yeni bir GA ve sezgisel yöntem önermişlerdir. Önerilen GA, iki farklı uygunluk değerlendirme yaklaşımı, onarım algoritmaları ve bir çeşitlendirme stratejisi göz önüne alınarak Pareto-optimal çözümler üretmek için tasarlanmış ve oluşturulan 96 test problemi üzerinde test

edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, GA'nın çözüm kalitesi ve işlemci süresi açısından paralel istasyon ile stokastik DHDP'ni çözmek için etkili ve verimli bir çözüm algoritması olarak kabul edilebileceğini göstermiştir.

Avikal vd. (2013a) parçaları öncelik kısıtlarını dikkate alarak U şeklindeki demontaj hattında bulunan iş istasyonlarına atamak için bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Sezgisel, farklı kriterleri ele alırken iş istasyonu sayısını minimize etmeyi amaçlamaktadır. Önerilen sezgisel yöntem tarafından elde edilen çözüm, diğer sezgisel çözümlerle karşılaştırılmış ve yöntemin önemli ölçüde daha iyi sonuç ürettiği görülmüştür.

Avikal vd. (2013b) parçaları demontaj iş istasyonlarına öncelik ilişkilerini dikkate alarak atayan yeni bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ve PROMETHEE yöntemleri, önerilen sezgisele dahil edilmiş ve yöntem 8 parçadan oluşan kişisel bilgisayar örneği üzerinde uygulanmıştır. Önerilen sezgisel yöntemin iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Avikal vd. (2013c) demontaj görevlerinin iş istasyonlarına atanması için çok kriterli karar verme yöntemini dikkate alan yeni bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Önerilen sezgiselde PROMETHEE yöntemi atanacak görevlere öncelik vermek için kullanılmıştır. Görevler, demontaj iş istasyonlarına öncelik sırasına ve öncelik ilişkilerine göre atanmıştır. Önerilen sezgisel yöntem bir örneğe uygulanmış ve diğer sezgisel yöntemlere kıyasla performansta önemli iyileşmeler sağladığı sonucuna varılmıştır.

Tuncel vd. (2014) Monte-Carlo tabanlı bir pekiştirmeli öğrenme tekniği (reinforcement learning technique) kullanarak DHDP'ni ele almışlardır. Bu pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı DHDP'nin altında yatan dinamiklere göre uyarlanmıştır. Araştırma sonuçları, pekiştirmeli öğrenme temelli yöntemin, karmaşık bir problemde bile, makul bir hesaplama süresi içinde etkili bir şekilde uygulanabileceğini göstermiştir

Igarashi vd. (2014) Hitachi şirketi tarafından geliştirilen ve ekonomik parça seçimiyle tamsayı programlama kullanarak optimal bir demontaj sistemi tasarımı önermişlerdir. İlk aşamada, ekonomik kısıtlamalı tamsayı programlama ile çevresel

ve ekonomik parça seçiminin optimizasyonu ve ikinci aşamada istasyon sayısını en aza indirmek suretiyle tamsayılı programlama ile hat dengeleme optimizasyonu dikkate alınmıştır.

Avikal vd. (2014a) demontaj parçalarını istasyonlara öncelik ilişkilerini dikkate alarak atayabilmek için sezgisel bir yöntem önermişlerdir. Demontaj hattına atanacak görevlerin seçimi için bulanık analitik hiyerarşi süreci (BAHS) ve PROMETHEE yöntemlerini kullanmışlardır. Önerilen sezgisel yöntem bir örnekle gösterilmiş ve sonuçlar McGovern ve Gupta (2003) tarafından önerilen sezgisel yöntem ile karşılaştırılmıştır. Önerilen sezgiselin, iş istasyonlarının çevrim süresi ve boşa kalma süresi (idle time) bakımından iyileşmeler gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Avikal vd. (2014b) ve/veya öncelik ilişkisini kullanarak Kano modeli, bulanık AHP ve M-TOPSIS tabanlı bir teknik uygulamaktadır. Demontaj iş istasyonlarına öncelik sırasına ve öncelik ilişkisine göre verilen görevler atanmıştır. Önerilen teknik bir örnek üzerinde uygulanmıştır ve sonuçlar diğer tekniklerle karşılaştırıldığında performansta iyileşme olduğu sonucuna varılmıştır.

Ilgın (2019) DEMATEL tabanlı bir demontaj hattı dengeleme yaklaşımı önermiştir. Önerilen yaklaşım literatürdeki iki örneğe uygulanmıştır. Uygulama sonrasında önerilen yaklaşımın literatürde daha önce önerilen yaklaşımlarla karşılaştırıldığında tatmin edici bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

1.3.2. Metasezgisel Yöntemler

McGovern ve Gupta (2005) tehlikeli ve yüksek talep gören bileşenlere yönelik DHDP'ne çözüm bulmak için yerel arama sezgiseli olan greedy algoritması önermişlerdir. Kullanılan yöntemde parça demontaj hattını dengelemek için 2-opt algoritması geliştirilmiştir. Buna ek olarak, sırayı daha hızlı belirleyebilmek için bir tepe tırmanma (hill-climbing) sezgiseli önerilmiştir.

McGovern ve Gupta (2006) karınca kolonisi algoritmasıyla DHDP'nde optime yakın ya da optimal sonuçlar elde etmektedir. Ele alınan çok amaçlı DHDP, öncelik ilişkileri korunurken iş istasyonlarının sayısının en küçüklenmesini ve iş istasyonlarındaki boş zamanı birbirine yakın hale getirmeyi amaçlamaktadır.

Bununla birlikte, zararlı bileşen içeren ve talebi yüksek parçalar mümkün olduğunca erken demonte edilmeye çalışılırken, aynı zamanda demontaj hareket yönü aynı olan parçaların birlikte demonte edilmesi amaçlanmaktadır.

McGovern ve Gupta (2007a) DHDP'nin NP-tam problemler sınıfına ait olduğunu matematiksel olarak ispatlamış ve genetik algoritmayı dikkate alan bir çalışma yapmışlardır. Genetik algoritmada, genler parça numaraları ile temsil edilmekte ve yalnızca kısıtları sağlayan demontaj sıraları popülasyonun elemanlarını oluşturabilmektedir. Kromozomların uygunluk değerleri denge ölçütü açısından karşılaştırılmaktadır. Çalışmada asıl amaç, verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısı ve boşta kalma süresinin minimizasyonu ile birlikte zararlı parçaların öncelikle demontajıdır.

McGovern ve Gupta (2007b) DHDP'nin NP-tam problemler sınıfına ait olduğunu matematiksel olarak ispatlamıştır. Buna ek olarak çalışmada genel amaçlı arama (exhaustive search) sezgiseli önermişlerdir. Daha önceki çalışmalarında demontaj hattı için kullanılan genetik algoritma, karınca kolonisi, greedy algoritması, hill-climbing ve 2-Opt karma sezgiselleri önerilen bu sezgisel ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada amaç verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısının ve boşta kalma süresinin (idle time) minimizasyonudur.

Agrawal ve Tiwari (2008) demontaj hattı operasyonlarında insan faktörüyle ilgili görev-zaman değişkenliğinin karmaşıklığına değinmiştir. Bu karmaşıklıkları gidermek için makalede stokastik görev zamanları ile karma model U şeklinde bir demontaj hattı önerilmiştir. Önerilen bu yaklaşım için İşbirlikçi Karınca Koloni Optimizasyonu (İKKO) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, hat dengeleme ve demontaj sıralama problemlerini aynı anda çözen yeni bir yaklaşımdır.

Ding vd. (2010) çok amaçlı DHDP için matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Bu çok amaçlı optimizasyon problemini çözmek için yeni bir çok amaçlı karınca kolonisi optimizasyonu (ÇAKKO) algoritması önerilmiştir. Önerilen yönteme ek olarak, Pareto optimum çözümlerini aramak için niş teknolojisi (niche technology) kullanılmıştır. Sonuçlara bakıldığında, önerilen ÇAKKO'nun demontaj hattı dengelemesinde çok amaçlı optimizasyon için uygun olduğu görülmüştür.

Kalaycı ve Gupta (2013a) verilen çevrim zamanı altında boşta kalma süresinin minimizasyonu, zararlı parçaların öncelikli demontajı ve yüksek talepli parçaların öncelikli demontajını amaçlamışlardır. Çözüm yöntemi olarak Parçacık sürü optimizasyonunu kullanmışlardır. Kalaycı ve Gupta (2013b) aynı amaçlar doğrultusunda karınca kolonisi algoritmasını kullanmışlardır. Kalaycı ve Gupta (2013c) aynı amaçları dikkate almış fakat çözüm yöntemi olarak yapay arı kolonisi algoritmasını kullanmıştır.

Kalaycı ve Gupta (2013d) demontaj önceliği sınırlamalarını yerine getirirken bir yandan da sıranın dikkate alındığı (sequence dependent) ve fazla amacı olan sıra bağımlı demontaj hattı dengeleme problemini ele almışlardır. Çalışmalarında yöntem olarak benzetim tavlama önerilmiştir. Önerilen algoritmanın üstün işlevselliğini göstermek için karınca kolonisi optimizasyonu, parça sürüsü optimizasyonu ve tabu arama yaklaşımları ile karşılaştırılmıştır.

Kalaycı ve Gupta (2014) sıra bağımlı demontaj hattı dengeleme problemini ele almışlar ve dört hedef belirlemişlerdir: (1) demontaj iş istasyonlarının sayısını en aza indirmek, (2) işleri iş istasyonları arasında eşit dağıtmak (3) tehlikeli bileşenleri demontaj sırasından mümkün olduğunca erken çıkarmak ve (4) öncelikle yüksek talebi olan bileşenleri demonte etmektir. Çalışmada tabu arama algoritmasına dayalı yeni bir yaklaşım önerilmiştir.

Kalaycı vd. (2015a) çalışmalarında her ikisinin de NP-tam olarak tamamlandığı bilinen DHDP'nin ve sıraya bağlı bir demontaj hattı dengeleme probleminin (SBDHDP) etkin bir şekilde çözülmesini amaçlamışlardır. Sorunu çözmek için kanıtlanmış bir çözüm yöntemi diye bilinen değişken komşuluk araştırması (DKA) kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda literatürde bulunan DHDP'leri, önerilen yaklaşımın etkinliğini göstermek için sayısal örnekler kullanılarak analiz edilmiştir. Önerilen algoritma, literatürdeki diğer tekniklerle karşılaştırılmış ve daha üstün performans gösterdiği görülmüştür.

Kalaycı vd. (2015b) DHDP'ndeki görevlerin işlenme zamanlarını üçgen bulanık üyelik fonksiyonları ile formüle etmişlerdir. Çalışmada yeni bir veri seti üzerinde problemi çözmek için karma bir yapay arı koloni algoritması önermişlerdir. Ayrıca, bulanıklığın hibrit kesikli yapay arı kolonisi algoritmasının hesaplamalı

karmaşıklığı üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve önerilen algoritmanın çözüm kalitesi yapay arı kolonisi algoritmasının geleneksel versiyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda, önerilen algoritmanın üstün olduğu sonucuna varılmıştır.

McGovern ve Gupta (2015)'nin demontaj hattı ve montaj hattı üzerine yaptıkları çalışmada amaç öncelikle montaj ve demontaj formüllerini birleştirmek ve özetlemektir. Sonrasında, formüller arasında bütünlüğün sağlanması için yeni formülasyonlar eklemek ve daha sonra montaj ve demontaj arasındaki benzerlikleri ve farklılıkları göstermektir. Yöntem olarak demontaj için adapte edilmiş birkaç bilinen montaj hattı formülü ile birlikte, montaj ve demontaj hattında kullanılmak üzere beş ölçüt (iki özel ve üç genel) önermişlerdir.

Kalaycı vd. (2016) yaptıkları çalışmada demontaj önceliği sınırlamalarını yerine getirirken aynı zamanda demontaj görevlerinin demontaj iş istasyonlarına atanmasını gerektiren çok sayıda amaca sahip SBDHDP'ni ele almışlardır. SBDHDP'ni çözmek için genetik algoritmayı, değişken komşuluk arama yöntemi (DKAGA) ile birleştiren bir karma algoritma önermişlerdir.

Seidi ve Saghari (2016) birden fazla amacı olan Bulanık Demontaj Hattı Dengeleme Problemini (FDLBP) dikkate almış ve amaç olarak dört hedef belirlemişlerdir: (1) Demontaj hattındaki iş istasyonu sayısının en aza indirilmesi, (2) Tüm iş istasyonlarındaki boşta kalma sürelerinin en aza indirilmesi, (3) Tehlikeli parçaların mümkün olan en kısa sürede demonte edilmesi (4) Yüksek talepli parçaların düşük talepli parçalardan önce demonte edilmesi. Bu amaçları dikkate alarak GAMS ve MATLAB kullanılmış ve GA ile problem çözülmüştür.

Xiao vd. (2017) demontaj hattı dengeleme problemini, demontaj hiyerarşi bilgisi grafiğini (DHBG) oluşturarak, yönlendirilmiş ve ağırlıklı grafikte optimum yolu arama problemine dönüştürmüşlerdir. Daha sonra, demontaj sırasını belirleyebilmek için hibrit parçacık sürüsü optimizasyon algoritması (HPSO) önermişlerdir. Sonuçlar önerilen algoritmanın karmaşık DHDP'yi çözmek için verimli olduğunu göstermiştir.

Zhang vd. (2017) demontaj sürelerinin üçgen bulanık sayılar (ÜBS) olarak kabul edildiği çok amaçlı bulanık demontaj hattı dengeleme probleminin (ÇABDHDP) matematiksel bir modelini geliştirmişlerdir. Sonrasında, sorunu çözmek için bir geliştirilmiş yapay balık sürüsü algoritması (YBSA) önerilmiştir ve önerilen model LINGO yardımıyla çözülmüştür ve sonucunda önerilen YBSA'nın ÇABDHDP'nin çözümünde uygulanabilirliği sonucuna varılmıştır.

Liu vd. (2018) robotik DHDP'ni çözmek için geliştirilmiş çok amaçlı ayrık arılar algoritması (GÇADAA) önermişlerdir. Önerilen yöntemde robotik demontaj hattı dengeleme probleminin Pareto optimum noktaları farklı senaryolarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, önerilen yöntemin diğer optimizasyon algoritmalarına kıyasla daha iyi çözümler bulabildiği gösterilmiştir.

Zhu vd. (2018) demontaj işlemlerinde ortaya çıkabilen tehlikeleri demontaj hattı dengeleme probleminde değerlendirmiş ve maksimum tehlikeyi minimize etmek için çok amaçlı bir matematiksel model oluşturmuştur. Önerilen algoritmanın geçerliliği literatürdeki diğer algoritmalarla karşılaştırılarak test edilmiştir. Son aşamada, önerilen algoritma, saha araştırmasına dayanarak bir buzdolabı demontaj hattı problemini çözmek için uygulanmış ve üstün performans gösterdiği gözlenmiştir.

Fang vd. (2019) çok robotlu iş istasyonlarıyla dengelenmiş karma model demontaj hattı için çok amaçlı optimizasyona odaklanmış ve eş zamanlı kullanılan robot sayısını minimize etmek için bir matematiksel model önermişlerdir. Literatürdeki 8 ürün modeline ve oluşturulan 63 probleme, önerilen matematiksel model uygulanmıştır.

Wang vd. (2019a) tehlikeli işlerin önce sökülmesi, iş istasyonu sayısının minimize edilmesi ve iş yükünün eşit dağıtılmasını aynı anda optimize eden bir tavlama algoritması önermişlerdir. Önerilen yöntemin etkinliği ve üstünlüğü bir dizi test örneği ile doğrulanmıştır. Deneysel sonuçlara göre, önerilen yöntemin çevresel etkileri azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda demontaj hatlarının verimlilik göstergelerini de iyileştirebileceği sonucuna varılmıştır.

Wang vd. (2019b), demontaj işlemleri arasındaki etkileşimleri dikkate alarak sıraya bağlı bir demontaj hattı dengeleme problemini ele almış ve çok amaçlı bir matematiksel model oluşturmuşlardır. Bu model için yeni bir melez yapay arı kolonisi algoritması önermişlerdir. Önerilen algoritmanın performansı, bir takım kıyaslama örnekleri ve iki durum senaryosunda test edilmiştir. Test sonuçları, çözüm kalitesi ve hesaplama süresi açısından diğer bazı metasezgiseller ile karşılaştırılmış ve önerilen algoritmanın üstün performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

1.3.3. Matematiksel Modeller

Altekin vd. (2008), literatürde daha önce dikkate alınmamış kar amaçlı kısmi DHDP için bir karma tamsayılı programlama modeli geliştirmiştir. Geliştirilen modelde iş istasyonu sayısı ve çevrim zamanı karar değişkenleridir. Demontaj şebekesinde kullanılan ürün tabanlı gösterim, iş tabanlı öncelik ilişkileri diyagramına dönüştürülmüş ve “ardıl ve” olarak isimlendirilen yeni bir öncelik ilişkisi tanımlanmıştır. Çalışmada “ve”, ”veya” ve ”ardıl ve” olmak üzere 3 öncelik ilişkisi dikkate alınmıştır.

Koç vd. (2009), yaptıkları çalışmada verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısının minimizasyonuna odaklanmışlardır. Bu amaç doğrultusunda çözüm için karma tamsayılı doğrusal programlama yöntemini kullanmışlardır.

Altekin ve Akkan (2011), DHDP'nin çözümü için bir yaklaşım önermişler ve çalışmalarında iş hatalarının dikkate alındığı durumda hattın yeniden dengelenmesi problemini ele almışlardır. Geliştirilen karma tamsayılı programlama modeli ile hangi işlerin yapılacağı, verilen sayıda iş istasyonuna hangi işlerin atanması gerektiği ve karı maksimize edecek şekilde çevrim zamanının ne olması gerektiği belirlenmiştir.

Paksoy vd. (2013) birden fazla amaçla karma model DHDP için karma bir tamsayılı programlama modeli önermişlerdir. Yaptıkları çalışmada amaç olarak çevrim zamanı, istasyon sayısı ve istasyon iş yükü hedeflerinin sapma değerlerinin minimizasyonunu dikkate almış ve çözüm yöntemi olarak bulanık hedef programlama yöntemini kullanmışlardır.

Özceylan vd. (2013) DHDP'ni kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı problemine entegre etmişlerdir. Söz konusu entegrasyon için satın alma maliyetleri,

yenileme maliyetleri ve taşıma maliyetlerinin yanında istasyon sayısının da minimize edilmesi amaçlanmıştır

Özceylan ve Paksoy (2013) demontaj hattı dengeleme problemlerinde aşağıdaki koşulları aynı anda dikkate alan doğrusal olmayan bir karma tamsayılı programlama modeli önermişlerdir: (1) minimum maliyetle tesisler arasında optimal dağılım, (2) iş istasyonlarının sayısı minimize edilmesi, (3) çevrim süresinin minimize edilmesi, (4) iş istasyonlarına atanacak görevlerin optimum şekilde atanması şeklindedir. Önerilen modelin uygulanabilirliğini göstermek için çalışmada sayısal bir örnek verilmiştir.

Özceylan ve Paksoy (2014a) tersine tedarik zinciri (TTZ) ve demontaj hattı dengeleme problemlerinin entegrasyonu için bulanık programlama yaklaşımı sunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, demontaj istasyonlarını içeren bir TTZ'ni optimize ederken bulanık mantık yaklaşımını dikkate almak ve demontaj istasyonlarını eşzamanlı olarak dengelemektir. Çalışmada iki tip bulanık matematiksel programlama modeli kullanılmış ve bulanık yaklaşımların karşılaştırılması bir örnekle yapılmıştır.

Özceylan ve Paksoy (2014b) bir kapalı döngü tedarik zinciri ağ modelini ele almışlardır. İlk olarak, maliyet katsayıları, kapasite seviyeleri, piyasa talepleri ve ters oranlar gibi kritik parametrelerin kesin olmayan doğasını dikkate alan çok amaçlı, bulanık tam sayılı doğrusal olmayan bir programlama modeli önerilmiştir. Çözüm yaklaşımları ile önerilen model gerçekçi bir sayısal örnekle doğrulanmıştır.

Bentaha vd. (2014) belirsizlik altında bir DHDP'ni ele almışlardır. Çalışmada belirsizlikle başa çıkabilmek için stokastik bir program geliştirilmiştir. Geliştirilen model öncelikle kullanım ömrü sona ermiş ürün için en iyi demontaj alternatifini seçer ve hat demontaj işlemlerini, hat maliyetini en aza indirmek amacıyla hattın çalışma istasyonlarına atar. İkinci olarak, iş istasyonları için işletme maliyetlerini ve döngü süresi kısıtlama ihlalleri tarafından oluşturulan ceza maliyetlerini dikkate almaktadır. Önerilen bu çözüm algoritmasının, büyük ölçekli problem örnekleri için de yüksek kaliteli çözümler sunabildiği sonucuna varılmıştır.

Bentaha vd. (2015a) demontaj işlemlerinin sürelerinin belirsizliğini göz önünde bulundurarak demontaj hatlarını verimli bir şekilde tasarlamışlardır. Sonrasında karar vericilere, yaşam sonu ürünü için en iyi demontaj alternatifini seçmelerine ve demontaj görevlerini iş istasyonlarına atamalarına izin veren bir karar aracı geliştirmişlerdir. Önerilen çözüm yaklaşımının uygulanabilirliği, literatürdeki bir dizi demontaj problemi örneğinin çözülmesiyle gösterilmiştir.

Bentaha vd. (2015b) dengeli iş yüküyle maksimum gelir sağlayan bir üretim hattı tasarlamayı amaçlamıştır. Görev zamanlarının bilinen normal olasılık dağılımlarına sahip rastgele değişkenler olduğu kabul edilmiştir. Bir ve/veya grafiği görevler arasındaki öncelik ilişkilerini modellemek için kullanılmış ve lineer yaklaşım kullanılarak birkaç alt ve üst sınır şeması geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın uygunluğunu ve uygulanabilirliğini göstermek için, literatürden bir takım örnekler çözülmüştür.

Hazer ve Kara (2016) tek ürünlü paralel demontaj hattı dengeleme problemini (PDHDP) tanıtmışlar ve PDHDP'ni çözmek için çalışmalarında en kısa rota modeline dayanan bir model önermişlerdir. Önerilen model sayısal örneklere uygulanmıştır. Çalışmada demontaj hatlarının probleme özgü özelliklerini de değerlendirmek için kapsamlı bir test yapılmıştır.

Kalaycılar vd. (2016) sabit sayıda iş istasyonu bulunan bir DHDP'ni ele almışlardır. Çalışmada toplam net gelirin en üst düzeye çıktığı, görevlerin iş istasyonlarına uygun şekilde atandığı ve genel olarak tatmin edici sonuçların ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır.

Altekin vd. (2016), DHDP'ni ele aldıkları çalışmalarında, bir karma tamsayılı programlama modeli önermişlerdir. Çalışmada işlerin tamamlanma maliyetlerinin önemini göstermeyi ve baz çevrim süresinin etkisini analiz etmeyi amaçlamışlardır. Sonuçlara bakıldığında hattın durması azalmış ve bu sayede karlılıkta % 26 iyileşme olmuştur.

Igarashi vd. (2016) çalışmalarında daha düşük bir demontaj maliyeti ve daha yüksek geri dönüşüm için demontaj hattı dengelemesi ile CO₂ tasarrufu oranları için

çok kriterli optimizasyonun basit ve pratik bir modellenmesini ve tasarımını önermişlerdir.

Mete vd. (2016) DHDP için ışın araması (beam search) temelli bir yaklaşım önermişlerdir. Performans ölçüsü olarak iş istasyonlarının sayısının en aza indirilmesi amaçlanmış ve önerilen algoritma iyi bilinen gerçek vakaların ve üretilen test problemlerinin optimal çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ışın aramasına dayanan yaklaşımın, daha ileri araştırmalar için çok rekabetçi ve umut verici bir yöntem olduğu sonucunu göstermiştir.

İlgin vd. (2017)'de yaptıkları çalışmada DHDP'nin çözümü için doğrusal fiziksel programlama tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Önerilen bu yöntem karma model bir demontaj hattını dengelemek için kullanılmış ve yöntemin etkinliğine sonuçlar analiz edilerek değinilmiştir.

Ren vd. (2017) kâr odaklı bir kısmi demontaj hattı dengeleme problemi (PPDHDP) ele almışlar ve kârın maksimize edilmesini sağlamak için bu problemin matematiksel bir modelini oluşturmuşlardır. PPDHDP'yi çözmek için yerçekimi arama algoritmasına (Gravitational Search Algorithm - YAA) dayanan yeni ve etkin bir yaklaşım önerilmiştir. Ayrıca, önerilen algoritmayı test etmek için iki farklı ölçek vakası kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın mükemmelliğini göstermek için CPLEX yazılımı ile, parçacık sürüsü optimizasyonu, yapay arı kolonisi algoritmaları ve diferansiyel evrim ile bazı karşılaştırmalar sunulmuştur.

Altekin (2017) stokastik DHDP için en uygun çözümleri bulmayı amaçlamıştır. Bunun için iki adet ikinci dereceden koni programlama (SOCP1 ve SOCP2) modelleri ve beş parçalı doğrusal karma tamsayılı programlama modelleri sunulmuştur. Çalışmada toplam 10 problemin 240 örneğine ilişkin hesaplamalı analiz yapılmış, 7 modelin hepsinin GUROBI çözücü kullanarak pratik boyutta DHDP'ni optimize etmek için kullanılabileceği gösterilmiştir.

Edis vd. (2019) DHDP'ndeki dengeleme sorunları, parçaların tehlikeleri, talep miktarları ve yön değişikliklerini dikkate almışlardır. Çalışmada, incelenen problem için genel bir karma tamsayılı doğrusal programlama (KTDP) modeli geliştirilmiş ve performansı bir dizi kıyaslama örneği ile test edilmiştir.

Bu bölümde incelenen literatüre ek olarak, Güngör ve Gupta (1999), Ilgin ve Gupta (2010), Özceylan vd. (2018) ve Deniz ve Özçelik (2019) çalışmalarına da bakılabilir.

Yapılan kapsamlı literatür taraması sonucunda, bu çalışmada yapılan simülasyon optimizasyonu ve metasezgisel algoritmaları entegre olarak kullanan bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmanın literatürdeki bir boşluğu doldurarak, yeni çalışmalara da ışık tutması beklenmektedir

İKİNCİ BÖLÜM

SİMÜLASYON OPTİMİZASYONU

2.1 SİMÜLASYON OPTİMİZASYONU

Simülasyon bir sisteme ait neden sonuç ilişkilerinin bilgisayar ortamına aktararak sistemin davranışlarının bilgisayarda izlenmesini sağlayan bir modelleme tekniğidir. Simülasyon optimizasyonu ise, tüm olasılıklardan en iyi girdi değişkenlerini bulmak için kullanılır. Carson ve Maria'nın (1997) çalışmasına göre, simülasyon optimizasyonunun amacı, gerekli kaynakları en aza indirmek ve simülasyon deneyi tarafından elde edilen bilgileri en üst düzeye çıkarmaktır. Simülasyon optimizasyonu çok çeşitli pratik problemleri çözebilir. Sezgisel algoritmalar, metasezgisel algoritmalar, stokastik yaklaşım yöntemleri simülasyon optimizasyonu çalışmalarında en sık kullanılan optimizasyon tekniklerinden bazılarıdır (Azadivar, 1999). Simülasyon optimizasyonu iki ana sınıfa ayrılır (April vd., 2003; Fu, 2002): Klasik yaklaşımlar ve metasezgisel yöntemler.

2.2 SİMÜLASYON OPTİMİZASYONUNDA KLASİK YAKLAŞIMLAR

Fu (2002), simülasyon optimizasyonu ile ilgili 4 klasik yaklaşım tanımlamaktadır:

- Stokastik yaklaşım algoritmaları
- Sıralı tepki yüzeyi yöntemi
- Rastgele arama
- Örnek yol optimizasyonu

Stokastik yaklaşım algoritmaları, deterministik optimizasyonda kullanılan eğim arama temelli bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, bir arama yönünü belirlemek için

amaç fonksiyonunun eğimi tahmin edilmelidir (April vd., 2003). Stokastik yaklaşımdaki zorluk, en iyi sonucu elde etmek için tekrarlanan formülün çok sayıda yinelemesine ihtiyaç duyulmasıdır (Tekin ve Sabuncuoğlu, 2004).

Sıralı tepki yüzeyi yöntemi temelde metamodel üretme prensibine dayanır, ancak bunu daha yerel bir şekilde yapar. Başka bir deyişle, metamodeller tüm çözüm uzayında nesnel işlevi karakterize etmeye çalışmak yerine, araştırmancının şu anda çalıştığı yerel alanda yoğunlaşmaktadır (April vd., 2003).

Rastgele arama algoritmaları yinelemeli olarak mevcut tek bir tasarım noktasından mevcut noktanın çevresindeki başka bir tasarım noktasına gider. Teknik, tüm arama bölgesinden rastgele noktaları seçer (Smith, 1973). Arama bölgesi çok sayıda p boyutlu nokta kombinasyonu içerdiğinden, belirtilen sayıda bilgisayarın çalışması tamamlandığında algoritma durur (Tekin ve Sabuncuoğlu, 2004).

Örnek yol optimizasyonu, deterministik sürekli optimizasyon problemleri için geliştirilen bilgi ve deneyimden yararlanır. Amaç, n tane rastgele değişkene dayanan deterministik bir işlevi optimize etmektir ve n , örnek yolunun boyutudur (April vd., 2003). Genelde n , yaklaşık optimizasyon probleminin orijinal optimizasyon problemine yakın olması için büyük olmalıdır (Andradottir, 1998).

Klasik optimizasyon yöntemleri araştırmacılar tarafından fazla ilgi görmesine rağmen, genellikle kullanıcının teknik karmaşıklığa karşı çok dikkatli olmasını gerektirir. Deney tasarımı ve gradyan yöntemleri gibi bu yöntemlerin birçoğu kullandıkları araştırma stratejisi sayesinde maksimum ve minimum noktalara duyarlı olacaktır. Ayrıca, bu yöntemlerin simülasyon paket programlarında uygulanması kolay değildir. Mevcut durumda simülasyon yazılım programları, kullanıcılarına optimizasyon yöntemleri için tercih edilen metodoloji olarak metasezgisel yöntemleri kullanır. Simülasyon optimizasyonunda kullanılan metasezgisel yaklaşımlardan bir sonraki bölümde bahsedilmiştir.

2.3 SİMÜLASYON OPTİMİZASYONUNDA METASEZGİSEL YAKLAŞIMLAR

Metasezgisel yaklaşımlar modern optimizasyonun önemli bir parçası haline gelmiştir. Tanım olarak bakıldığında metasezgiseller, yerel iyileştirmelerden kaçma ve çözüm alanı hakkında daha iyi bir arama yapma işlevine sahip bir süreç

oluşturmak amacı ile, yerel iyileştirme aşamaları ile daha üst düzey stratejiler arasındaki etkileşimi düzenleyen çözüm yöntemleridir. Zamanla, bu yöntemler karmaşık çözüm alanlarındaki yerel optimum durumunun üstesinden gelmek için bazı aşamaları da içermektedir. Bu aşamalar, bir çözümden diğerine geçiş için kabul edilebilir hareketleri tanımlamak veya yapıcı ve yıkıcı süreçlerde çözümler oluşturmak için kullanılır (Glover ve Kochenberger, 2002).

Simülasyon optimizasyonu için çeşitli metasezgisel yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler arasında saçılma araştırması, genetik algoritmalar, benzetilmiş tavlama, tabu araması, sinir ağları, yapay arı kolonisi ve parça sürüsü optimizasyonu bulunur. Her ne kadar bu yöntemler genellikle deterministik bağlamda kombinatoriyal optimizasyon için tasarlanmış olsalar ve birçoğu garantili yakınsamaya sahip olmasalar da, simülasyon optimizasyonuna uygulandığında oldukça başarılı olmuşlardır (Olafson ve Kim, 2002).

Bu çalışma kapsamında kombi demontajı için simülasyon optimizasyonu tabanlı metasezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Dolayısıyla çalışmada kullanılan tavlama benzetimi ve genetik algoritma yöntemleri ile ilgili detaylı bilgi devam eden bölümlerde verilmiştir.

2.3.1 Genetik Algoritma

İlk olarak 1975 yılında John Holland tarafından ortaya atılan GA, birçok alanda geniş çapta incelenmiş, denenmiş ve uygulanmıştır. Gerçek dünyadaki problemlerin çoğu klasik yöntemlerle çözmek açısından zor olduğu için, GA'lar sayesinde optimal parametrelerin bulunması amaçlanmıştır (De Jong, 1993). GA'lar, literatürdeki çeşitli kombinatoriyal optimizasyon problemlerini çözmek için başarılı bir şekilde uyarlanmıştır ve makul bir sürede optimal veya neredeyse optimal çözümler bulmak için metasezgisel yaklaşımlar arasında giderek daha popüler hale gelmiştir. GA'lar doğal evrim üzerine modellenmiştir ve doğal evrim sürecinden esinlenmiştir. Biyolojik organizmaların genetik sürecine dayanır. Birçok kuşak boyunca, doğal popülasyonlar “doğal seleksiyon” ve “en uygun olanın hayatta kalması” ilkesine göre gelişmektedir. Bu süreci taklit ederek ve uygun kodlamayla GA'lar çözümü geliştirir ve en iyi yaklaşımı sağlar. Genetik operatörler, bir popülasyondaki bireyleri optimal hale getirebilmek için birkaç nesil boyunca popülasyona uygulanır.

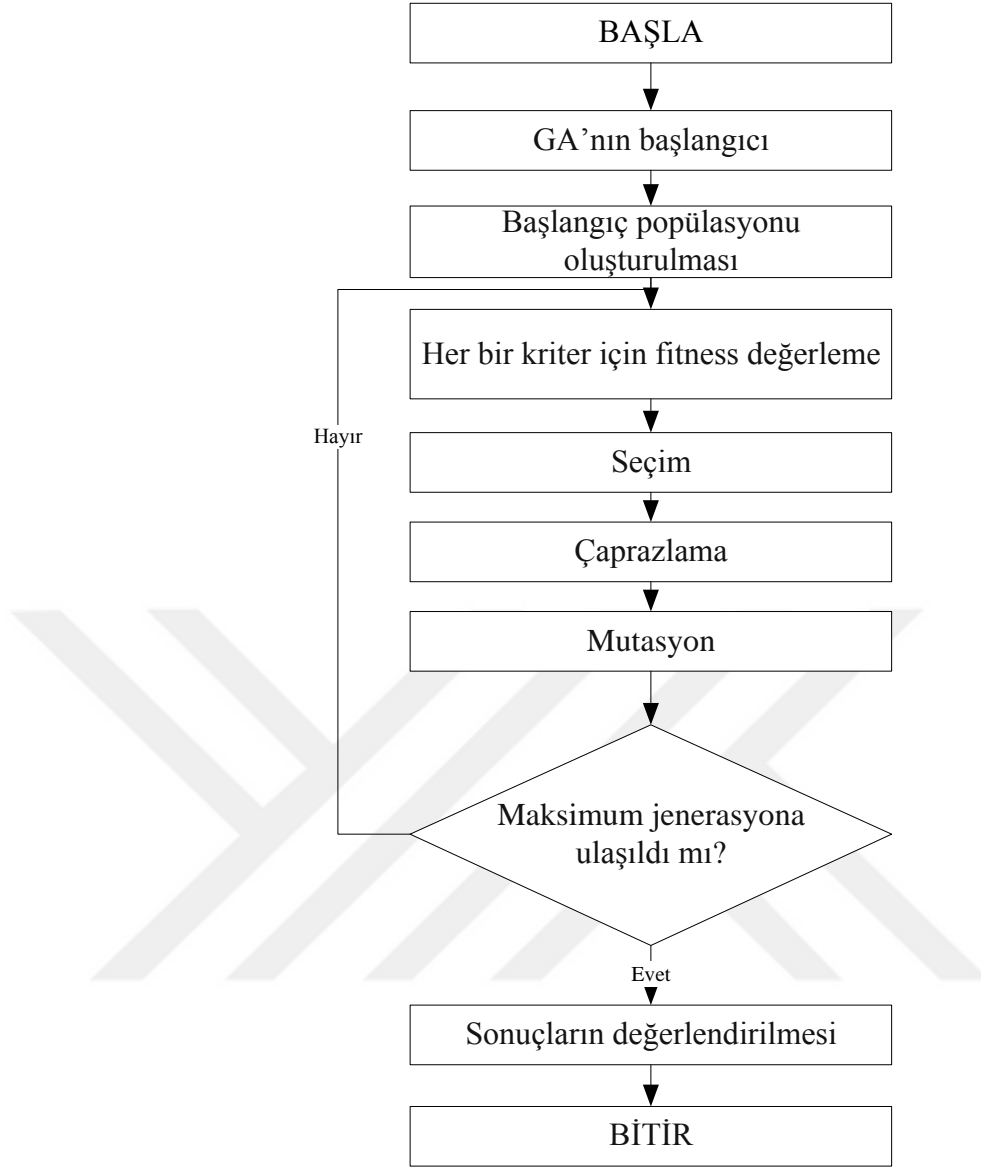
Başlangıçta GA sürekli doğrusal olmayan optimizasyon problemlerine ve daha sonra gezgin satıcı, araç rotalama, tesis yerleşimi, atölye çizelgelemesi, tedarik zinciri ve ulaşım, envanter yönetimi problemleri gibi kombinatoriyal optimizasyon problemlerine uygulanmıştır (Gen ve Cheng, 1997).

GA, aşağıdaki özellikleri nedeniyle diğer optimizasyon yöntemlerinden farklıdır (Gen ve Cheng, 1997; Goldberg, 1989).

1. GA, parametrelerin kendileriyle değil, parametre kümelerinin bir kodlaması ile çalışır.
2. GA, tek bir çözümden değil, bir çözüm topluluğundan arama yapar.
3. Yardımcı bilgileri değil, amaç fonksiyonunu kullanır.
4. GA deterministik kuralları değil stokastik kurallarını kullanır.

GA'ların uygulanmasında atılması gereken adımlar aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Şekil 2):

- 1. Adım:** Rastgele n kromozom popülasyonu oluşturun.
- 2. Adım:** Bir sonraki nesil için seçimlerini belirlemek amacıyla, amaç fonksiyonu olan $f(x)$ uygunluk değerlerini ve popülasyondaki tüm kromozomlar için karşılık gelen olasılıkları belirleyin. Daha yüksek uygunluk fonksiyonlu çözümler, daha fazla seçilme şansına sahiptir.
- 3. Adım:** n yavruları oluşana kadar aşağıdaki adımları tekrarlayın:
 - a.** Geçerli popülasyondan bir çift ana kromozom seçin.
 - b.** Çaprazlama rasgele seçilen bir noktada olasılık P_c 'ye ("çaprazlama oranı" veya "çaprazlama olasılığı" olarak adlandırılır) seçilen ana kromozom çiftine uygulayın.
 - c.** Her gende P_m olasılığı ("mutasyon oranı" veya "mutasyon olasılığı" olarak adlandırılır) ile iki yavru kromozomu mutasyona uğratın ve sonuçta elde edilen kromozomları yeni popülasyona yerleştirin.



Şekil 2. Genetik algoritma akış diyagramı

4. Adım: Mevcut popülasyonu yeni popülasyonla değiştirin.

5. Adım: Durma kriterlerini tanımlayın. Sonlandırma veya durdurma kriterleri için çeşitli durdurma koşulları önerilmektedir. En yaygın olarak kullanılanlar, belirli bir nesilden sonra veya belirli bir süre sonra algoritmayı durdurmaktır. Başka bir yol, birkaç ardışık neslin uygunluk fonksiyonu değerleri düzelmediğinde aramayı durdurmaktır.

6. Adım: Durdurma kriteri doğru değilse, 2. adıma gidin aksi takdirde algoritmayı durdurun.

Yukarıda açıklanan adımların tamamlanmasına iterasyon denir. GA'daki belirli sayıda tekrardan sonra, bazen popülasyondaki çözümlerin çoğunda önemli bir değişiklik olmaz ve çözüm en uygun çözümden uzak olabilir. Bu gibi durumlarda, mutasyon operatörü çözüm setinde önemli değişiklikler yapılmasını sağlar. Nesil sayısını artırarak, optimum bir çözüme ulaşmaya veya ona yaklaşmaya çalışılmaktadır. Belirli sayıda nesilden sonra veya çözüm setinde olumlu bir değişiklik yoksa işlem durdurulur.

GA yönteminde çözüm bir birey veya bir kromozomdur. Kromozomlar, bir kromozomun bir veya daha fazla özelliğini kontrol eden gen adı verilen ayrı birimlerden oluşur. Holland'ın ortaya attığı uygulamada, bir kromozomu temsil etmek için bir ikili dize kullanılır (Şekil 3). Bununla birlikte, şimdiye kadar birçok GA uygulamasında çeşitli kromozom gösterimleri kullanılmıştır.

1	1	0	1	0	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Şekil 3. İkili kromozom gösterimi

2.3.1.1 Kodlama

Bir kromozom, çözüm uzayında tek bir çözüme karşılık gelir. Bu, çözüm uzayı ve kromozomlar arasında bir eşleme mekanizması gerektirir. Bu eşlemeye kodlama denir. Aslında GA, sorunun kendisi üzerinde değil, bir sorunun kodlanması üzerinde çalışır. Uygunsuz bir kodlama şemasının kullanılması birçok GA algoritmasının başarısızlığının nedeni olmuştur.

2.3.1.2 Başlangıç popülasyonu

Tabu Arama veya Tavlama Benzetimi gibi tek arama yaklaşımlarının aksine, GA'lar popülasyon adı verilen bir grup kromozomla çalışır. Literatüre bakıldığında GA'ların performansının başlangıç popülasyonunun kalitesinden etkilendiği görülmüştür. Literatürdeki GA uygulamalarının çoğunda, popülasyonun çeşitliliğini artırmak için başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulur. Algoritmanın performansını değerlendirmek için öncelik bilgisi mevcut değilse, rastgele başlangıç popülasyonu oluşturma yöntemi genellikle tercih edilir. Soruna özgü bilgileri kullanmak, ilk popülasyonu oluşturmak için başka bir yöntemdir. Bu durumda GA, probleme özgü gereksinimleri karşılayan bir dizi kromozomla başlar (Pham ve Karaboga, 2000).

2.3.1.3 Uygunluk (Fitness) fonksiyonu

İlk popülasyonu oluşturduktan sonra, popülasyondaki her kromozom bir uygunluk fonksiyonu kullanılarak değerlendirilir. Uygunluk fonksiyonu, bir kromozomun performansını değerlendirmek ve derecelendirmek için kullanılır. Bir kromozomun uygunluğu, seçim sürecinin temelini oluşturan gerçek bir sayıdır.

2.3.1.4 Genetik operatörler

Genetik Algoritma için genetik operatörler aşağıdaki gibidir;

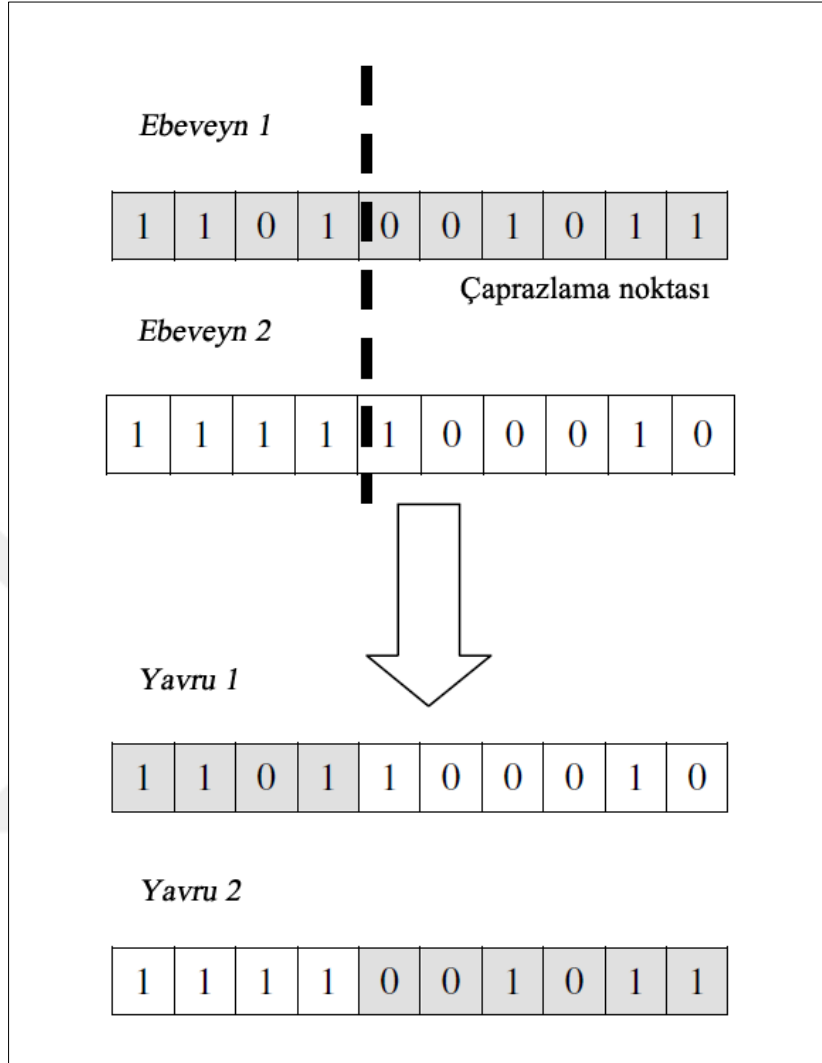
- Seçim
- Çaprazlama
- Mutasyon

Seçim, arama sürecini bir arama alanında daha ümit verici bölgelere doğru yönlendirmek için kullanılır. Seçimin amacı, daha yüksek uygunluk fonksiyon değerlerine sahip daha fazla kromozom kopyası üretmektir. Bu nedenle, seçim sürecinin araştırmayı gelecek vaat eden bir alana doğru yönlendirmede ve kısa sürede iyi çözümler bulmada önemli bir rolü vardır.

Gen ve Cheng (1997) ve Goldberg (1989) 'da gösterildiği gibi rulet tekerleği, turnuva, sıralama ve elitizm gibi çeşitli seçim yöntemleri kullanılabilir. Rulet tekerleği seçimi, bu orantılı seçim mekanizmasında en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Rulet tekerleği seçiminde, kromozomların uygunluk değerleri, tekerlek üzerindeki yuvaların genişliklerini temsil eder. Temel olarak, turnuva seçimi ise popülasyondan rastgele seçilen birkaç kromozom arasında birkaç turnuva yapılmasını içerir. Her turnuvanın galibi (en iyi uygunluk fonksiyonuna sahip olan) çaprazlama için seçilir.

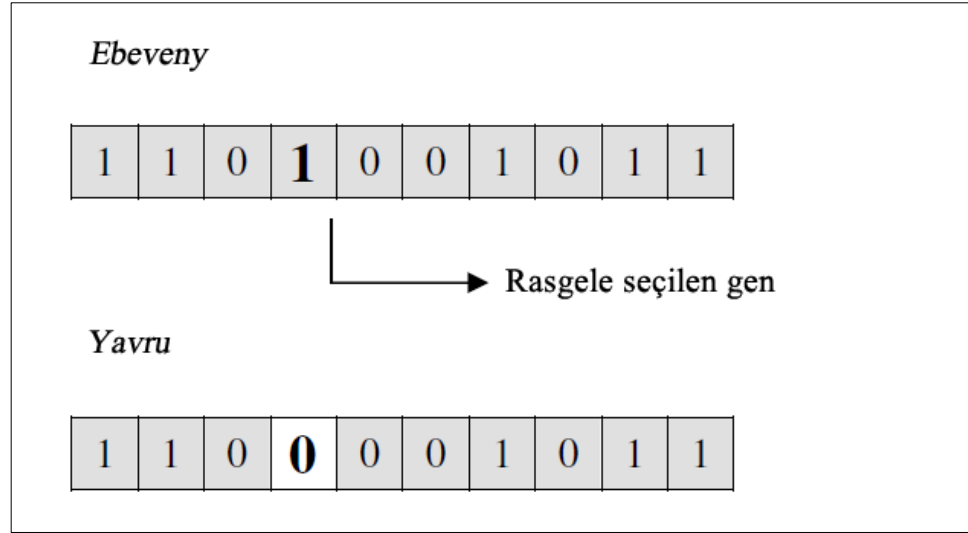
Çaprazlama, iki ebeveyn alır ve iki yavru üretir. Bu operatör, yavrular oluşturmak için kromozom çiftlerini çiftleştirmek için rastgele bir konum seçer. Tek noktalı, iki noktalı, çoklu noktalı ve düzgün çaprazlama gibi birçok türde çaprazlama operatörü vardır. Çaprazlama operatörünün en basit versiyonu olan tek noktalı çaprazlamada, çaprazlama noktasına göre genler değiştirilir. Geçiş noktaları genellikle rastgele belirlenir. Şekil 4'de tek noktalı çaprazlama operatörü açıklanmaktadır. Çaprazlama, aynı anda ebeveyn1 ve ebeveyn2 olarak adlandırılan

iki ana kromozom üzerinde çalışır ve her iki ana kromozomun özelliklerini yeniden birleştirerek yavru1 ve yavru2 olarak adlandırılan iki yavru üretir.



Şekil 4. Tek noktalı çaprazlama

Mutasyon, genellikle gen seviyesinde uygulanır. Mutasyonda popülasyondaki tüm kromozomlar kontrol edilir ve genlerin değerleri, mutasyon oranı olarak bilinen belirli bir orana göre değiştirilir. Mutasyonun temel amacı optimum çözümün bulunmasında, popülasyondaki kromozom çeşitliliğinin artırılarak arama uzayının genişletilmesidir. Mutasyon operatörü, algoritmayı çözüm alanındaki yeni alanları aramaya zorlar. Çaprazlama operatörü gibi, bu operatörün de literatürde birçok çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan en temel olanı tek noktalı mutasyondur (Şekil 5).



Şekil 5. Tek noktalı mutasyon

2.3.1.5 Sonlandırma kriteri

Sonlandırma kriteri için çeşitli durma koşulları önerilmiştir. En yaygın olarak kullanılanlar, belirli sayıda neslin ardından veya belirli bir süre sonra algoritmayı durdurmaktır. Başka bir seçenek, birkaç nesil için popülasyondaki ortalama veya en iyi uygunluk fonksiyon değerinde bir değişiklik olmadığında aramayı durdurmaktır.

2.3.2 Genetik Algoritma İle Simülasyon Optimizasyonunun Kullanımı

Bu bölümde Simülasyon Optimizasyonu ile birlikte Genetik Algoritmanın kullanıldığı çalışmalara değinilmiştir.

İlgın ve Tunalı (2007) otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir üretim sisteminin önleyici bakım ve yedek parça politikalarının birlikte optimizasyonu için genetik algoritma kullanan bir simülasyon optimizasyon yaklaşımı önermişlerdir. Mutasyon olasılıkları, popülasyon büyüklüğü ve kuşak sayısı dahil olmak üzere genetik algoritma parametreleri için en iyi değerleri belirlemek üzere deney tasarımı yapılmıştır. Önerilen yaklaşım, üretim sisteminin verimini artırırken maliyette önemli bir azalma sağlamıştır.

Fontanili vd. (2009) üretim parametrelerini optimize etmek için akış simülasyonu ve genetik algoritmaları birlikte kullanmışlardır. Başlangıçta, göz ardı edilebilen (bypass) iş istasyonlarına sahip bir montaj hattının yönetimi için temel parametreleri dikkate almışlardır. Daha sonra, optimum parametrelerin elde edilmesi için akış simülasyonu ve genetik algoritma arasındaki kombinasyonun geçerliliğini

kontrol etmek için iki optimizasyon durumu geliştirilmiştir. İlk durum, yalnızca bir tür ürünün üretilmesine karşılık gelmiş ve ikinci durumda birkaç farklı tipte ürünün aynı anda üretilmesi dikkate alınmıştır.

Ding vd. (2010) tedarikçi seçimi için yeni bir simülasyon optimizasyon metodolojisi sunmuştur. Metodoloji üç temel modülden oluşmuştur: genetik algoritma, ayrık olay simülasyonu ve bir tedarik zinciri modelleme çerçevesi. Önerilen metodolojinin, belirsizlikleri dikkate alabildiği ve tedarikçi portföyünü optimize edebildiği sonucuna varılmıştır. Buna ek olarak, önerilen metodolojinin uygulanabilirliğini göstermek için gerçek hayattan bir vaka çalışması sunulmuştur.

Azadivar ve Wang (2000) sistemin dinamik özelliklerini ve operasyonel kısıtlamalarını bir bütün olarak göz önünde bulunduran bir tesis yerleşimi optimizasyonu tekniği sunmuştur. Çalışmada genetik algoritma ve simülasyon optimizasyonu bir sistem performans değerlendirme aracı olarak kullanılmıştır. Simülasyonun yükünü azaltmak için istatistiksel bir karşılaştırma tekniği ile birleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın geleneksel yerleşim düzeni optimizasyon yöntemlerinin sınırlarını aştığını ve optimal veya en uygun çözümleri bulma yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir.

Köchel ve Nielander (2010) kanban kontrol mekanizmalı optimal tasarım problemini incelemişlerdir. Probleme, literatürden genel bir kriter fonksiyonu dikkate alınmıştır. Çalışmada genetik algoritma ile simülasyon modeli birleştirilmiştir ve uygulanan örnekler neticesinde yaklaşımın kullanılabilirliği görülmüştür.

Amiri ve Mohtashami (2012) üretim hatlarında tampon tahsisi probleminin (buffer allocation problem) çok amaçlı bir formulasyonunu sunmuştur. Tampon tahsisi problemlerine yönelik çözüm yöntemlerinin çoğunluğu, işlem zamanlarını, arızalar arasındaki zamanı ve tamir zamanlarını deterministik varsaymaktadır. Bu makalede, üretim hatlarının tüm parametreleri için genel fonksiyon dağılımlarını göz önünde bulundurabilecek simülasyon ve genetik algoritma tabanlı bir metodoloji önerilmiştir.

Lin vd. (2012) genetik algoritmanın gücünü, simülasyon sonuçlarını değerlendirmek ve arama sürecini yönlendirmek için kullanılan veri zarflama analizi

ile birleştiren çok amaçlı bir simülasyon optimizasyon yaklaşımı önermişlerdir. Öneride, bir tasarım noktasının veri zarflama analizinden gelen göreceli verimlilik puanı, genetik algoritmanın seçim operasyonundaki uygunluk değeri olarak kullanılmıştır. Algoritmayı cerrahi servislerde en uygun kaynak seviyelerini belirlemek için uygulamışlardır. Sayısal deneyler, algoritmanın etkili bir şekilde sonuç verdiğini ve verimli tasarım noktalarını belirlediğini göstermiştir.

Alanjari vd. (2014) malzeme hareketini modellemek için sezgisel algoritmalar, genetik algoritmalar ve simülasyon kullanarak reaktif yerleştirme politikasını optimize etmeye yönelik bir yaklaşımı ortaya koymaktadır. Yeni yaklaşım, malzeme yönetiminin dinamik doğasını modellemek için analitik araçları ve sezgisel bilgileri birleştirmiştir. Bir vaka çalışması yapılmış ve önerilen optimizasyon yönteminin reaktif yerleşim alanı yönetiminde uygun ve etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

Zeng vd. (2015) rıhtım vinci programlaması için bir karma tamsayı programlama modeli geliştirmiştir. Model, giden konteynerlerin istifleme planını ve rıhtım vinçlerinin çalışma sırasını dikkate almaktadır. Modeli çözmek için, iki seviyeli genetik algoritma adı verilen bir sezgisel yöntem tasarlanmıştır. Bu arada, optimizasyon algoritmasının akıllı karar mekanizmasını ve simülasyon modelinin değerlendirme fonksiyonunu entegre eden bir simülasyon optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Sayısal deneyler, ikili çevrimin yükleme ve boşaltma işlemlerinin ayrı ayrı planlanması yöntemine kıyasla iskele vinçlerinin çalışma süresini azaltabileceğini göstermektedir. Ayrıca, bu makalede geliştirilen model ve algoritmalar, rıhtım vinci problemini verimli bir şekilde çözebilmektedir.

Lin ve Chen (2015) bir montaj tesisinde atölye çizelgeleme problemi için bir simülasyon optimizasyon yaklaşımı sunmuşlardır. Amaç, üretim hattının ve makine tipinin her bir sipariş için her aşamada optimum tahsisini belirleyerek mümkün olan minimum akış zamanını elde etmektir. Sorunun karmaşık ve stokastik niteliği nedeniyle bir simülasyon optimizasyonu yaklaşımı benimsenmiştir. Performans değerlendirmesi için bir simülasyon modeli ve genetik algoritma uygulaması birlikte dikkate alınmıştır. Ayrıca, simülasyonun avantajını ortaya çıkarmak için farklı talep seviyeleri, ürün karması ve parti büyüklüğü senaryo analizleri yapılmıştır.

Jalali ve Nieuwenhuysse (2015) yaptıkları kapsamlı literatür taramasında metasezgisel algoritmaların (özellikle genetik algoritmalar) ve birkaç simülasyon optimizasyon tekniğini birleştiren yöntemlerin en popüler olduğunu bulmuşlardır. Çalışmada karmaşık envanter yönetimi problemlerini inceleyen araştırmacılar için yararlı bir genel bakış sunulmuştur. Son olarak, araştırma alanındaki eğilimler ve boşluklar vurgulanarak, ileri araştırmalar için öneriler sunulmuştur.

Amaran vd. (2015) kapsamlı bir literatür araştırması yapmışlardır. Matematiksel programlamaya kıyasla simülasyon optimizasyonundaki zorlukları vurguladıkları çalışmada, en güncel algoritmaları incelemişlerdir. Farklı yaklaşımlar dikkate alınmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

İlgin ve Taşoğlu (2016) siparişe göre demontaj ve demontaj sırası kararlarının aynı anda belirlenmesi için genetik algoritma tabanlı bir simülasyon optimizasyon yaklaşımı önermişlerdir. Önerilen yaklaşımın uygulanabilirliği, sayısal bir örnek verilerek gösterilmiş ve genetik algoritma parametrelerinin en iyi değerlerini belirlemek için Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır.

Yin vd. (2017) Monte Carlo tabanlı risk yönetim modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model esnek ve karar vericilere kar, maliyet ve risk analizleri için çeşitli biçimlerde uygulama yapma imkânı verebilmektedir.

Leung ve Lau (2018) büyük ölçüde Yapay Bağışıklık Sistemlerine (Artificial Immune System - YBS) dayanan bir hibrit çok amaçlı optimizasyon algoritması önermişlerdir. Bu önerilen algoritma, biyolojik evrimden türetilen çaprazlama operatörünü dahil ederek YBS'i Genetik Algoritma ile hibritler ve kıyaslama algoritması oluşur. Önerilen kıyaslama algoritmasının performansını değerlendirmek için simülasyon temelli bir problemde uygulanabilirliği test edilmiştir. Sonuçlar, önerilen algoritmanın, özellikle çözüm çeşitliliği açısından diğer kıyaslama algoritmalarından daha iyi performans gösterdiğini ortaya çıkarmıştır.

Kang ve Bhatti (2018) süreç iyileştirmesi önerdikleri çalışmalarında çok amaçlı optimizasyon sağlamak için genetik algoritma ve ayrık olay simülasyonunu birlikte kullanmışlardır. Önerilen yaklaşımda, imalat ortamını, gerçek ortamın getirdiği kısıtlamaları ve kaynaklarla ilişkili farklı değişkenlik seviyelerini test etmek için ayrık olay simülasyonunu kullanarak veriler elde edilmiş ve yorumlanmıştır.

Ju ve Liu (2019) Konvansiyonel Genetik Algoritma'nın (KGA) olumsuz yönlerini, KGA'nın rüzgar çiftliği yerleşim problemi için çaprazlama ve mutasyon adımlarının etkilerini incelemişler ve yeni bir algoritma önermişlerdir. Daha sonra Monte Carlo simülasyonunu kullanılarak bir problem üzerinde uygulaması yapılmıştır. Sonuçlara göre önerilen yöntemin rüzgar çiftliği yerleşim problemlerinde daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır.

2.3.3 Tavlama Benzetimi

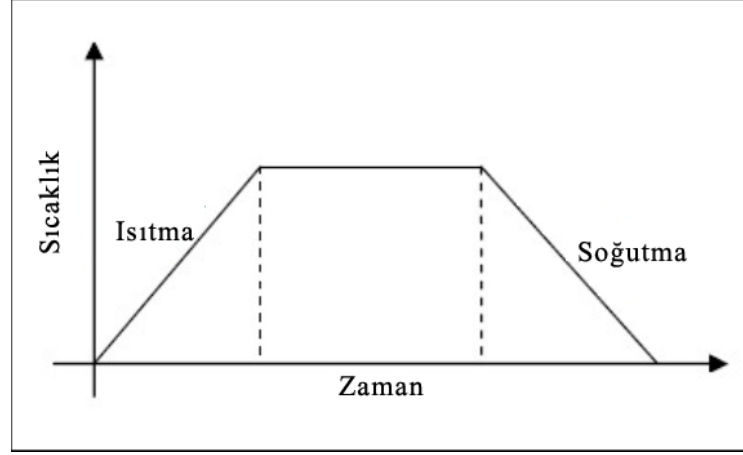
Tavlama Benzetimi (TB), kombinatorial optimizasyon problemlerini çözen Monte Carlo Simülasyonu tabanlı bir yöntemdir. Bu yaklaşım, metallerin fiziksel olarak tavlama işleminden esinlenilerek kombinatorial problemlerin çözümleri için geliştirilmiştir (Magoulas vd., 2002). Bu bölümde TB hakkında daha fazla bilgi verilecektir.

TB yöntemine genel olarak bakılırsa, kombinatorial optimizasyon problemlerini çözmek için tanımlanan genel bir arama algoritmasıdır. TB algoritması ismini demir tavlama anlamına gelen tavlama (annealing) kelimesinden almıştır. Tavlama, sistemin iç yapısındaki fiziksel veya kimyasal özelliklerini değiştirmek için uygulanan ısıtma ve soğutma işlemi olarak tanımlanır (Kirkpatrick vd., 1983).

Tavlama işleminin temel amacı, sistemin sıcaklığını arttırmak ve daha sonra yavaş yavaş soğutmak suretiyle mevcut veya rastgele oluşturulmuş durumlardan sistemin amaçlanan yapıya kavuşmasını sağlamaktır. Dolayısıyla, tavlama işlemi, fiziksel bir sistemin ısıtılması ve soğutulması süreçleri olarak iki adımdan oluşmaktadır. Öncelikle, fiziksel sistemin enerjisini yükseltmek için ısıtılma işlemi gerçekleştirilir, böylece atomların sistem içerisinde serbestçe dağılması sağlanarak dengesiz bir yapı elde edilir. Daha sonra sistemin istenilen yapısını elde etmek amacıyla sistem yavaş bir şekilde soğutulur (Dowsland, 1995).

Soğutulma işlemi sürecinde atomların farklı enerji seviyelerine geçmesi sağlanarak sistemin yapısı üzerinde değişiklik sağlanır. Bu süreç, sistemin daha düzgün ve kararlı bir fiziksel yapıya dönüşmesine imkan tanır. Soğutma işlemi, fiziksel sistemin minimum enerji seviyesine ulaşıncaya kadar devam eder. Bu enerji seviyesi ancak başlangıç veya maksimum sıcaklık yeterince yüksek olduğunda ve

fiziksel sistem çok yavaş soğutulduğunda elde edilir. Katı bir cisim üzerinde gerçekleştirilen ısı işlem süreci Şekil 6'da gösterilmiştir (Eglese, 1990)



Şekil 6. Katı bir cisim için ısı işlem süreci

Genel olarak bir sezgisel algoritma, rastgele bir çözüm üretip arama uzayı alanındaki komşu çözümleri sistematik olarak araştırarak en iyi çözümü elde etmeyi amaçlar. TB algoritması, yukarıda bahsedilen tavlama işleminden esinlenerek geliştirilen yerel bir arama algoritmasıdır.

Algoritmanın çalışma mantığını anlamak için, en alçak noktası aranılan bol delikli bir golf sahasını örnek olarak göstermek mümkündür. Golf sahasının en alçak noktasını bulmak için sahaya konulan bir top ile sahanın eğimi yönünde ilerlemek gibi basit bir yöntem kullanılırsa, topun deliklerden birine takılma olasılığı yüksektir. Bu sorunu çözmek için, arazi olduğu gibi sallanırsa, top arada bir deliklere girse de arazi sürekli bir şekilde sallandığı için top delikten tekrar çıkmaktadır. Zamanla sallama hızı ağır ağır azaltılarak sallama tamamen durduğunda topun sahanın en derin noktasında (global minimum) yada yakın yerlerde olduğu kabul edilir. Golf sahası örneğindeki sallama hareketinin nesnelere sıcaklığına karşılık geldiği söylenebilir. Bir gazın soğutulmasında atomlar belirli bir süre sonra nasıl periyodik zamanlarla bir araya gelip potansiyel enerjiyi azaltıyorlarsa TB algoritması da benzer metodu kullanarak enerjiyi değil tanımlanan bir amaç fonksiyonunu minimize etmeye çalışmaktadır (Avcı, 2008).

TB, diğer yöntemlerin yerel minimuma ulaşması aşamasından sonra global minimum için çok daha fazla arama yapmamasının sonucunda ortaya çıkan eksikliği çözmeye çalışan bir yöntemdir. Ayrıca, yerel arama yöntemindeki benzer temel

süreçleri kullanırken sadece bir istisnası bulunmaktadır. Soğutma süreci TB algoritmasında daha iyi sonuçların elde edilmesini sağlayacak yeni komşu çözümlerin üretilmesini sağlayan üstel bir ifadedir.

TB algoritmasının prensibine bakılırsa, optimizasyon problemlerinde TB algoritması katı metallerdeki ile benzer özellik göstermektedir. Sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda algoritmada bulunan farklı çözümlerin arasında serbest bir şekilde geçiş yapılabilir. Yeni bulunan çözüm kötü olsa da kabul edilebilmektedir. Sıcaklığın düşmesiyle yeni çözüm eğer daha iyiye kabul edilir ve kötü çözümler için kabul edilme durumu ise olasılıksal bir şekilde azaltılmış olur.

Kötü çözümler Boltzmann'ın (1866) olasılık dağılımı dikkate alınarak kabul edilmektedir. Termal olarak dengede olan bir sistemin T sıcaklığındaki enerjisi (E) olasılıksal bir şekilde dağıtılır. $P(E)$ burada enerji seviyesi ve k ise Boltzmann sabitidir. Sistem yüksek seviyedeki sıcaklıklarda olduğunda farklı bir seviyedeki enerji durumunda olabilirken, sıcaklığın düşmesiyle yüksek enerji durumunda bulunma ihtimali oldukça düşüktür.

$$P(E) = e^{-E/kT} \quad (1)$$

Bu bölümde TB algoritması adım adım anlatılmıştır.

1.Adım: Bir başlangıç vektörü x_i ile başlayın ve fonksiyona yüksek bir sıcaklık değeri atayın.

2.Adım: Rastgele yeni bir tasarım noktası oluşturun ve önceki fonksiyon ile geçerli fonksiyon değerleri arasındaki farkı bulun.

3.Adım: Yeni noktanın geçerli noktadan daha iyi olup olmadığını belirtin.

4.Adım: Yeni noktanın değeri eşitlik 1'den büyükse, x_{i+1} noktasını kabul edin.

5.Adım: X_{i+1} noktası reddedilirse, algoritma rastgele yeni bir tasarım noktası x_{i+1} üretir. Bununla birlikte, algoritmanın bir kabul olasılığına dayalı olarak daha kötü bir noktayı kabul ettiği belirtilmelidir (Rao, 2009).

TB'nin daha kolay anlaşılabilmesi için akış diyagramı Şekil 7'de verilmiştir.

TB'de bir iterasyonda bir sonraki adım için mevcut adımın tamamlanmasını gerektirmektedir. Seri algoritmada her adımda tek bir çözüm bulunur ve mevcut ile karşılaştırılır. Günümüzde kullanılan yöntemleri kullanılarak her adımın uygun işlere dağıtılmasıyla birden fazla çözüm üretilip bunlar için en uygun olanı seçebilmek mümkündür. Bu sayede seri algoritma için gereken süre içerisinde paralel bir yöntemde birden fazla çözüm üretilerek daha iyi sonuçların bulunabilme ihtimali de artmış olmaktadır.

TB algoritmasında kullanılan parametreler doğru bir şekilde belirlendiği takdirde problemin çözümünde daha kolay sonuç alınabilmektedir ve dolayısıyla parametreler çözümde önemli rol oynamaktadır. TB algoritmasında 3 temel parametre vardır:

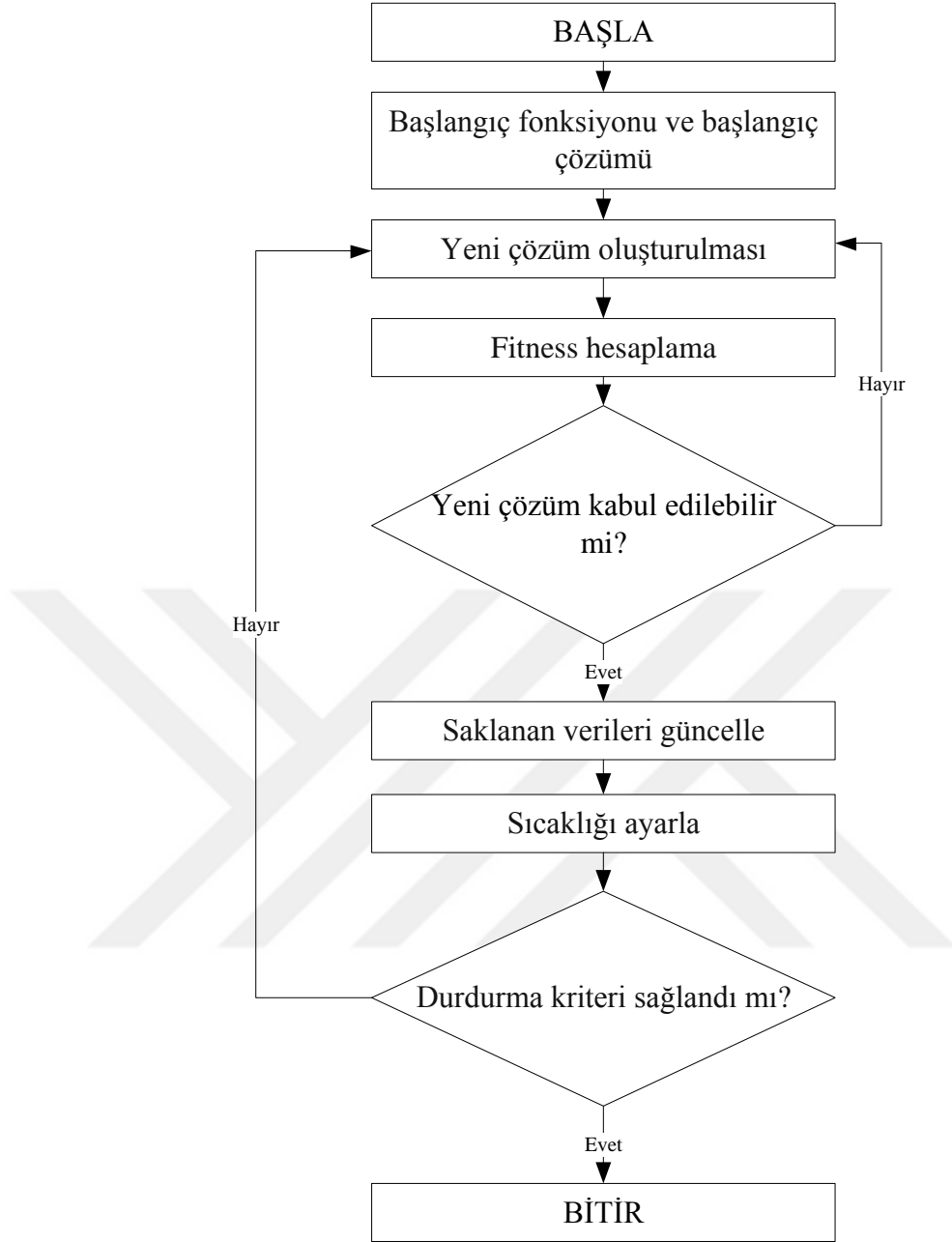
- Başlangıç Sıcaklığı
- Soğutma Oranı
- Durdurma Kriteri

2.3.3.1 Başlangıç Sıcaklığı

TB'nin uygulanması katıların tavlanması işlemine dayanmaktadır. Başlangıç sıcaklığı, aramanın ilk aşamalarında yeterince yüksek derecede rastgele ayarlanmalıdır (Lin vd., 1993). Böylece ilk hareketlerin çoğu kabul edilir. Başlangıç sıcaklığının değeri TB'nin başlangıcında, kabul olasılığı (P_c) değerinin 1'e çok yakın olacağı şekilde düzenlenir.

2.3.3.2 Soğutma Oranı

Yavaş soğuma sağlamak için sıcaklık yavaşça düşürülmelidir. $T_n = \alpha T_{n-1}$, formülü kullanılarak sıcaklık düşürülür. Burada α , soğutma hızıdır ve değeri sıfır ile bir arasındadır. Başlangıç sıcaklığı, başlangıç kabul olasılığına göre tahmin edilir ve son sıcaklık da (T_f), son kabul olasılığına (P_f) benzer şekilde tahmin edilebilir. Bu nedenle, soğutma hızı ve başlangıç sıcaklığı, nihai kabul olasılıklarının değerlerine ve sıcaklık azaltma fonksiyonuna bağlıdır.



Şekil 7.Tavlama Benzetimi Akış Diyagramı

2.3.3.3 Durdurma Kriteri

el_{max} maksimum yineleme sayısına ulaşıldığında TB algoritması sona erer. el_{max} , son iterasyonun bitiminde T_f 'ye (yani, son sıcaklığa veya donma sıcaklığına) ulaşılacak şekilde belirlenebilir. Bunu kontrol etmek için, son iterasyonun bitiminde nihai sıcaklık $T_f = T_{in}.el_{max}$ kullanılarak hesaplanabilir. Son sıcaklığın değeri $T_f = T_{in}.el_{max}$ formülasyonuna göre tahmini nihai sıcaklığa çok yakın veya eşit değilse, o zaman el_{max} yeniden seçilmeli ve soğutma hızı (α) yeniden

hesaplanmalıdır. Bu işlem, gerekli iterasyon sayısı (el_{max}) belirlenene kadar tekrarlanmalıdır.

2.3.4 Tavlama Benzetimi ile Simülasyon Optimizasyonunun Kullanımı

Bu bölümde Simülasyon Optimizasyonu ile birlikte TB'nin kullanıldığı çalışmalara değinilmiştir.

Lacksonen (2001) dört endüstriyel simülasyon probleminin varyasyonlarını, Hooke-Jeeves arama, Nelder-Mead simpleks, TB ve GA gibi optimizasyon algoritmalarını kullanarak karşılaştırmıştır. 25 test probleminin tümü için en iyi çözümlere yaklaşık çözüm bulunduğundan genetik algoritmanın en güvenilir sonucu verdiği görülmüştür.

Rosen ve Harmonosky (2005) TB ve simülasyon optimizasyon yöntemlerini dikkate alan bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemin performansı, 40'tan fazla iş istasyonundan oluşan bir üretim sisteminin ayrıntılı bir simülasyon modeli oluşturularak test edilmiştir. Önerilen metodun, diğer yöntemlere göre üstün veya eşdeğer çözümler elde edebildiği sonucuna varılmıştır.

Alrefaei ve Diabat (2009) çok amaçlı simülasyon optimizasyon problemlerini çözmek için bir TB algoritması sunmuşlardır. Sunulan algoritma, sabit sıcaklıkta TB fikrine dayanır ve aday çözümü kabul etmek için bir kural kullanır. Algoritmanın optimal çözüme yakınsadığı görülmüştür. Sonuç olarak algoritma çok amaçlı bir envanter problemine uygulanmış ve sayısal sonuçlar algoritmanın hızlıca yakınsadığını göstermiştir.

Mattila ve Virtanen (2014) bir savaş uçağı filosunun bakım çizelgeleme problemi için çok amaçlı bir simülasyon optimizasyonu yaklaşımı geliştirmişlerdir. Amaçlar, faaliyetlerin hedef ve fiili başlangıç zamanları arasındaki ortalama sapmayı en aza indirmek ve ortalama uçak mevcudiyetini en üst seviyeye çıkarmaktır. Yaklaşım bir dizi test probleminin yanı sıra gerçek hayattan bir örnek probleme uygulanmıştır.

Wang vd. (2016) TB algoritmasına dayalı bir optimizasyon yöntemi önermiştir. Isı entegrasyonu olan ve olmayan iki farklı sistem, belirtilen basınç prosedürleri ve basınç optimizasyonu kullanılarak bu yöntem ile optimize edilmiştir.

TB tabanlı optimizasyon metodunun, global optimum, otomatik hesaplama ve daha az hesaplama süresi elde etmek için yüksek bir olasılık avantajına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Güçdemir ve Selim (2017) iş atölyelerinin üretim kaynaklarını daha verimli kullanmak için müşteri ilişkileri yönetimi ve üretim planlama ve kontrol yaklaşımlarını entegre etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla, bir TB temelli simülasyon optimizasyonu yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın uygulanabilirliğini doğrulamak için gerçekçi bir atölye sistemine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, müşteri ilişkileri yönetimi ve üretim planlama ve kontrol yaklaşımlarının mağazalardaki sistemlere entegrasyonunun, müşterileri memnun etmek için kaynakların daha etkin kullanılmasını sağladığını ve önerilen yaklaşımının pratikte kolaylıkla uygulanabileceğini ortaya koymuştur.

Özcan vd. (2017) hem hastalar hem de sağlık tesisleri için daha iyi performans elde edilmesini ve kaynakların uygun şekilde ayarlanmasını sağlayan bir simülasyon optimizasyon ve TB temelli bir karar destek aracı geliştirmişlerdir. Simülasyon optimizasyon modeli, hasta ihtiyaçlarını karşılayabilen, yatak ve ameliyathanelerin optimum kullanımını sağlamayı amaçlamaktadır. Sonuç olarak, yatak kullanım oranının düşük olduğu ve çalışmakta olan uzmanların uzun süre aylak bekledikleri sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte hasta odalarının aşırı büyük ve ameliyathane kapasitesinin az olmasından dolayı sistemin tıkanık olduğu sonucuna da varılmıştır.

Ameli vd. (2019) bireysel üretici sorumluluğuna dayalı bir ürün ailesi için tasarım alternatifinin seçimi ve ömrü tükenmiş ürünleri belirlemek üzere iki karar sorununu birleştirmişlerdir. Bu sorunları formüle etmek ve çözmek için TB tabanlı bir simülasyon optimizasyonu modeli geliştirilmiştir. Modelin uygulamasını göstermek için gerçek hayat problemi dikkate alınmıştır. Önerilen modelin, üreticilerin ömrü tükenmiş ürünlerin performansını değerlendirmelerinde ve politika yapıcıların üreticilerin belirli bir dairesel ekonomi stratejileri paketine yanıtlarını tahmin etmelerinde faydalı bir araç olduğu sonucuna varılmıştır.

Taşoğlu ve Yıldız (2019) entegre rihtim tahsisi ve rihtim vinç çizelgeleme problemleri için simülasyon optimizasyon temelli bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir.

İlk olarak, stokastik kullanım süreleri göz önünde bulundurulmuş ve bir rıhtım vinç çizelgeleme algoritması önerilmiştir. Ardından, tipik bir konteyner terminalinin sahil operasyonlarını temsil eden genel bir parametrik simülasyon modeli inşa edilmiştir. Son olarak, TB tabanlı bir optimizasyon prosedürü, en son geminin kalkış saatini en aza indirmek için bu parametrik simülasyon modeliyle entegre edilmiştir. Önerilen yaklaşım, gerçek dünyadan ilham alan bir vaka problemine uygulanmış ve her bir gemi için tahmini yanaşma/yanılma zamanları, yanaşma yerleri ve rıhtım vinç programları belirlenmiştir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

SİMÜLASYON OPTİMİZASYONU İLE DEMONTAJ HATTI DENGELEME

3.1 PROBLEMİN TANIMI

Bu çalışmada bir kombi demontaj hattı dengeleme problemi için GA ve SA tabanlı bir simülasyon optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Literatüre bakıldığında demontajı yapılmış ürünler; Bilgisayar, Telefon, Radyo, Kalem, Pusula, El Feneri, Piston ve Biyel Kolu, Laptop, Dikiş Makinası, Kamyon, LCD Ekran, Klima, Çamaşır Makinası, Motor ve Yazıcı şeklindedir. Bu ürünlerden farklı olması amacıyla bu çalışmada Kombi ürünü seçilmiştir.

Kombi seçimi sonrası bir gerçek hayat problemi olması bağlamında İzmir’de bulunan bir kombi üretim firmasından veriler elde edilmiştir. Kombi demontajı ile ilgili veriler bu firmada çalışan bir uzman tarafından paylaşılmıştır. Tablo 3 kombi parçalarının karakteristik özelliklerini göstermektedir.

Tablo 3’de kombi parçalarının isimleri, talebi olan parçaların talep ve fiyat bilgileri ve parçaların tehlikeli olup olmadığı belirtilmiştir.

Tablo 4’de ürün demontajının karakteristik özellikleri (demontaj yönü, demontaj süresi, demontaj öncelik ilişkileri) verilmiştir. Demontaj hattı dengelemede stokastik işlem sürelerini dikkate alan çok az sayıda çalışma bulunmaktadır (Bentaha vd., 2014, 2015a, 2015b). Bu çalışmaların genelinde demontaj sürelerinin normal dağılım gösterdiği kabul edilmiş ve sadece demontaj süreleri stokastik alınmıştır. Bu çalışmada ise stokastik demontaj süreleri ve stokastik gelişler arası süreler birlikte “input alayzer” ile normal dağılım olduğu görülmüştür.

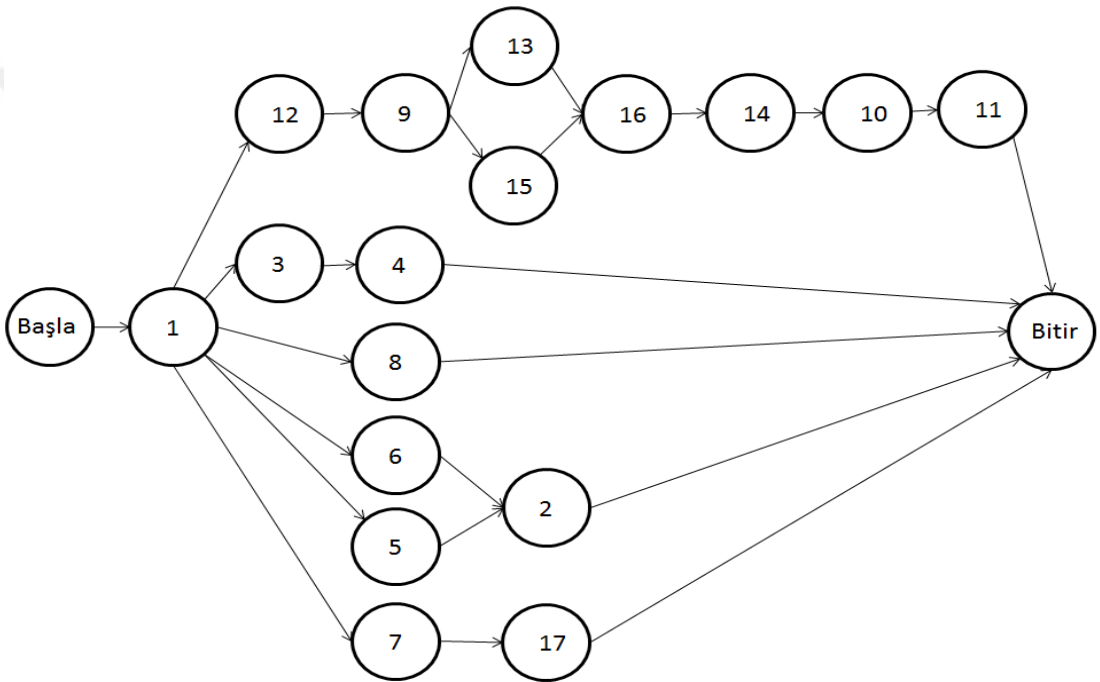
Tablo 3. Kombi parçalarının karakteristik özellikleri

<u>Parça Numarası</u>	<u>Parça İsmi</u>	<u>Fiyat (\$)</u>	<u>Telep (yıllık)</u>	<u>Tehlikeli parça</u>
1	Kapak	-	-	Hayır
2	Eşanjör	145	250	Hayır
3	Kombi fanı	-	-	Hayır
4	Venturi	-	-	Hayır
5	Ateşleme ve İyonizasyon bujisi	-	-	Hayır
6	Baca gazı sıcaklık sensörü	-	-	Hayır
7	APS	-	-	Hayır
8	Genleşme tankı	-	-	Hayır
9	Anakart	50	400	Hayır
10	Su Grubu	-	-	Hayır
11	Plakalı eşanjör	-	-	Evet
12	Kablo grubu	-	-	Hayır
13	Yoğuşma suyu tahliye sifonu	-	-	Hayır
14	Bakır boru grubu	-	-	Hayır
15	Gaz valfi	-	-	Hayır
16	Giriş/Çıkış sıcaklık suyu sensörleri	-	-	Hayır
17	Saç Aksam	-	-	Hayır

Tablo 4. Demontaj işleminin karakteristik özelliği

<u>Parça Numarası</u>	<u>Demontaj Süresi (dk)</u>	<u>Demontaj Yönü</u>	<u>Öncelik ilişkileri</u>
1	Norm(0.5, 0.05)	+x	-
2	Norm(4.5, 0.5)	+x	5,6
3	Norm(2.25, 0.25)	-y	1
4	Norm(0.6, 0.05)	+z	3
5	Norm(1.25, 0.25)	-x	1
6	Norm(0.3, 0.03)	+z	1
7	Norm(1.25, 0.25)	-y	1
8	Norm(1.25, 0.25)	+y	1
9	Norm(0.5, 0.05)	-z	12
10	Norm(0.6, 0.05)	-z	14
11	Norm(0.3, 0.03)	-x	10
12	Norm(1.25, 0.25)	-y	1
13	Norm(1.75, 0.25)	+z	9
14	Norm(2.75, 0.25)	+x	16
15	Norm(0.5, 0.05)	-z	9
16	Norm(0.4, 0.05)	-y	13,15
17	Norm(7.5, 0.5)	+x	7

Şekil 8 Kombi demontajı için öncelik ilişkilerini göstermektedir. Kombi, genel hatlarıyla 17 farklı parçadan oluşmaktadır. Demontaj işleminin başlayabilmesi için öncelikle 1 numaralı parçanın demonte edilmesi gerekmektedir. Son olarak ise 17 numaralı saç aksam demonte edilmelidir. Toplamda 17 parçadan oluşan Kombi demontajı için öncelik ilişkileri dikkate alınmak zorundadır. Şekil 8’de görüldüğü gibi 16 numaralı parçanın demonte edilmesi için öncelikle 13 ve 15 numaralı parçaların demonte edilmesi gerekmektedir. Aynı şekilde 14 numaralı parçanın demonte edilebilmesi için öncelikle 16 numaralı parçanın demonte edilmesi gerekmektedir.



Şekil 8. Kombi demontajı için öncelik ilişkileri

Problemin tanımını özetlemek gerekirse, 17 parçadan oluşan bir Kombi demontaj hattını GA ve SA metasezgisel algoritmalarını kullanarak simülasyon optimizasyonu ile dengelemek amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle Kombi demontajı için ARENA yazılımı kullanılarak simülasyon modeli kurulmuştur. Sonrasında bu model sırasıyla GA ve SA algoritmalarıyla çözülmüştür. Son olarak ise “Ful Faktör Analizi” ile her bir algoritmanın en iyi parametreleri bulunarak problem tekrar çözülmüş ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Bu adımlarla ilgili detaylı bilgiler aşağıdaki bölümlerde verilmiştir

3.2. SİMÜLASYON MODELİNİN TASARIMI

Bir sistemin nasıl çalıştığını görmek ve birkaç alternatif modeli birbiriyle karşılaştırmak için simülasyon yöntemi sık kullanılan bir yöntemdir. Bir sistemin istenen performanslara göre çalışması için, değiştirilebilir parametrelerin uygulanabilir değerlerini bulmak için çok sayıda simülasyon deneyi yapmak gerekir ve istenen çözüm her zaman elde edilemeyebilir. Bu nedenle, optimizasyon algoritmalarını simülasyon yöntemiyle birlikte kullanarak, özellikle karmaşık ve analitik olarak zor problemlerin çözümünde önemli iyileştirmeler yapılabilir. Simülasyon yöntemi girdileri optimizasyon algoritmalarından alır, performans ölçülerini değerlendirir ve çıktı sonuçlarını optimizasyon tekniğine geri verir. Bu mekanizmaya “simülasyon optimizasyonu” denir (Amaran vd., 2015).

Simülasyon optimizasyonu, tüm olasılıklardan en iyi girdi değişkenlerini bulmak için kullanılabilir. Carson ve Maria (1997)’ya göre, simülasyon optimizasyonunun amacı, gerekli kaynakları en aza indirmek ve simülasyon tarafından elde edilen sonuçları maksimize etmektir. Simülasyon optimizasyonu, rasgele çok çeşitli pratik problemleri çözebilir. Sezgisel algoritma, metasezgisel algoritma ve stokastik yaklaşım yöntemleri simülasyon optimizasyonu çalışmalarında en sık kullanılan optimizasyon tekniklerinden bazılarıdır (Azadivar, 1999).

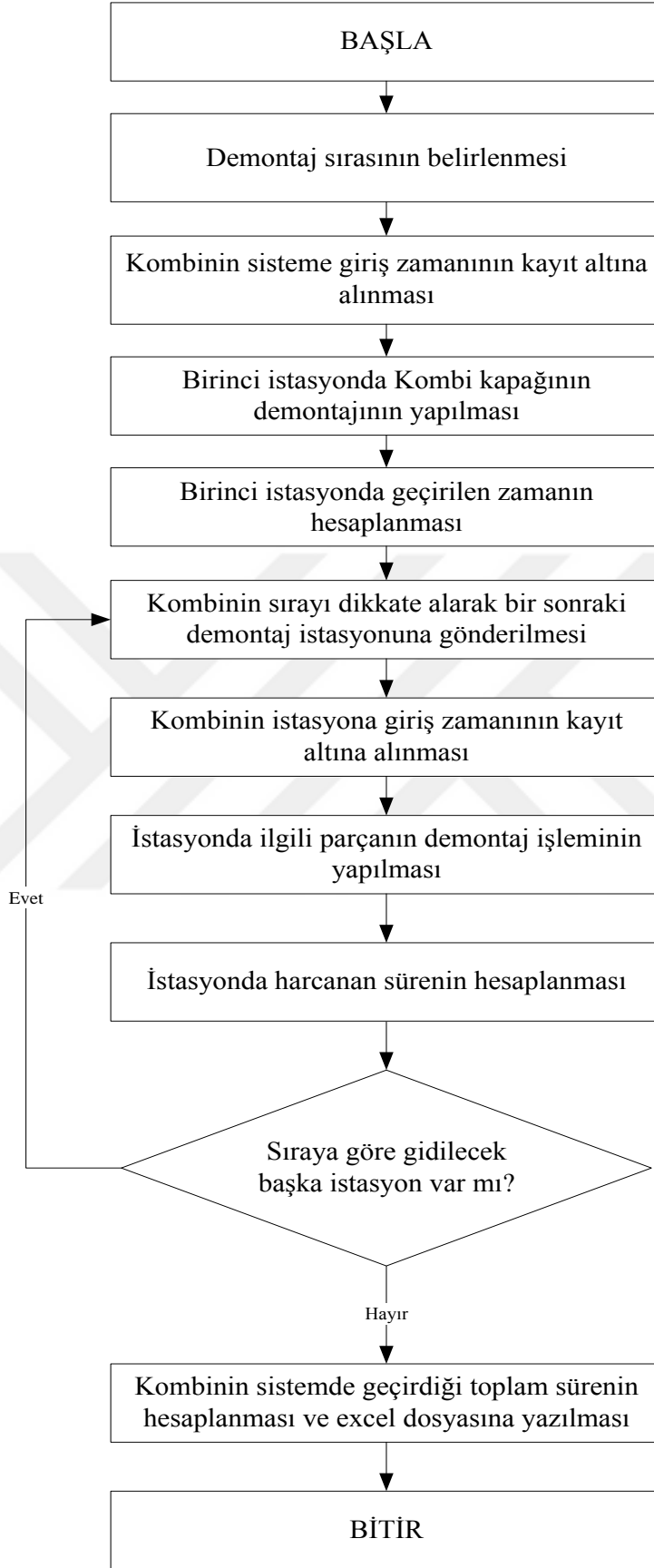
Simülasyon modeli Tablo 3’de sunulan veriler dikkate alınarak ARENA programı ile oluşturulmuştur. Model kurulurken demontaj süreleri ve gelişler arası süreler stokastik olarak dikkate alınmıştır. Model, toplamda günde 8 saat ve 12 ay olacak şekilde yıllık plan üzerinden toplamda 115,200 dk. (8 saat x 60 dk. x 20 gün x 12 ay) çalıştırılmıştır. Çalışmanın replikasyon sayısı ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

Genel hatlarıyla modelden bahsedecek olursak, Kombinin demonte edilebilmesi için öncelikle sisteme giriş yapması gerekmektedir. Sisteme giriş yapan Kombi demonte aşamasında öncelikle 1 numaralı “Kapak” parçasının demonte edilmesi gerekmektedir. Bu işlem için Kombi ilk bloka geldiğinde bir “Assign” modülü ile sisteme giriş zamanı kayıt altına alınmıştır. Sonrasında demonte edileceği blok girişinde ilgili istasyon numarası ile giriş yapar. İlgili bloktaki “Assign” modülü ile o blokta geçirdiği süre tutulur. Sonrasında “Process” modülü ile stokastik işlem süresi tanımlanır. Tekrar bir “Assign” modülü ile ilgili bloktaki kalış süresi

hesaplanır. Son olarak ise “Route” ile ilgili istasyona gönderilir. Bu işlem, öncelik ilişkilerini dikkate alarak ve demontaj süreci 17 parça için tamamlanana kadar devam eder. Demontaj sırası belirlenirken öncelikle ortalama çevrim süresi dikkate alınmıştır. İlk açılan istasyona ilk iş atandıktan sonra algoritma çevrim süresinin aşılmış olup olmadığını kontrol eder. Eğer çevrim süresi aşılmamış ise yeni bir iş ataması daha yapar ve sonrasında yeniden çevrim süresinin aşılmama durumunu kontrol eder. Bu durum çevrim süresini aşana kadar devam eder. Çevrim süresini aşan son atamadan sonra yeni bir istasyon açılır ve aynı kontroller orada da yapılır. Son iş atanınca atama işlemi son bulur. Şekil 9’da demontaj akış diyagramı verilmiştir.

Simülasyon modeli girilen veriler doğrultusunda bir uygunluk fonksiyonu hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu uygunluk fonksiyonunun hesaplanması aşamasında her bir sıra için farklı bir uygunluk fonksiyonu değeri ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple simülasyon modeli ve sonraki bölümde bahsedilecek olan metasezgisel algoritmalar entegre bir şekilde çalışmaktadır. Metasezgisel algoritmalarla bir olurlu sıra elde edilir ve bu sıra simülasyon modeline gönderilerek uygunluk fonksiyonu için bir değer elde edilir.

Simülasyon optimizasyonunun daha kolay anlaşılabilmesi açısından metasezgisel algoritmanın simülasyon modeline 1 – 3 – 8 - 6 – 4 – 12 – 5 – 7 – 2 – 9 – 17 – 15 – 13 – 16 – 14 – 10 – 11 olurlu sırasını verdiğini kabul edelim (Bölüm 3.1’de bulunan Şekil 8 kullanılarak sıranın uygunluğu kontrol edilebilir). ARENA programı bu sırayı kullanarak hesaplamaları yapar ve uygunluk fonksiyonu için bir değer elde eder. Bu çalışmada uygunluk fonksiyonu simülasyon programı açısından sistemde geçen toplam süreyi ifade etmektedir. Yukarıda bahsedilen olurlu sıra tüm olurlu sıralar içinden sadece biridir. Bu işlem için birçok farklı sıra elde etmek mümkün olduğu için ve bu sıraların matematiksel model ile elde edilmesi makul sürede mümkün olmayacağı için metasezgisel algoritmalara ihtiyaç duyulmuştur. Bu çalışmada kullanılan GA ve SA algoritmaları ile ilgili detaylar sonraki bölümde verilmiştir.



Şekil 9. Kombi demontaj işleminin simülasyon akışı

3.3 GENETİK ALGORİTMANIN TASARIMI

Genetik Algoritma ile ilgili detaylı bilgi bölüm 2.3.1'de verilmişti. Bu bölümde ise çalışma kapsamında kullanılan genetik algoritmanın kromozom gösterimi, başlangıç popülasyonu, genetik operatörler (seçim, çaprazlama ve mutasyon), uygunluk fonksiyonu ve tam faktör analizi ile parametrelerin optimize edilmesi hakkında bilgi verilmiştir.

Genetik algoritma bu çalışmada simülasyon optimizasyonunda kullanılacak ilk metasezgisel yöntemdir. Bu yöntemin elde edeceği olurlu bir sıra simülasyon modeline gönderilerek bu sıra için bir uygunluk fonksiyonu değeri hesaplaması istenir. Sonrasında bu değer metasezgisel algoritmaya geri gönderilir.

Şekil 10'da da görüldüğü üzere GA öncelikle bir başlangıç popülasyonu oluşturur. Sonrasında kromozom oluşturulur (olurlu sıra) ve simülasyon modeline gönderilerek modelde bu sıra değerlendirilir. Gönderilen bu kromozomlara seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanır. Maksimum jenerasyon sayısına ulaşılan kadar bu süreç tekrar eder.

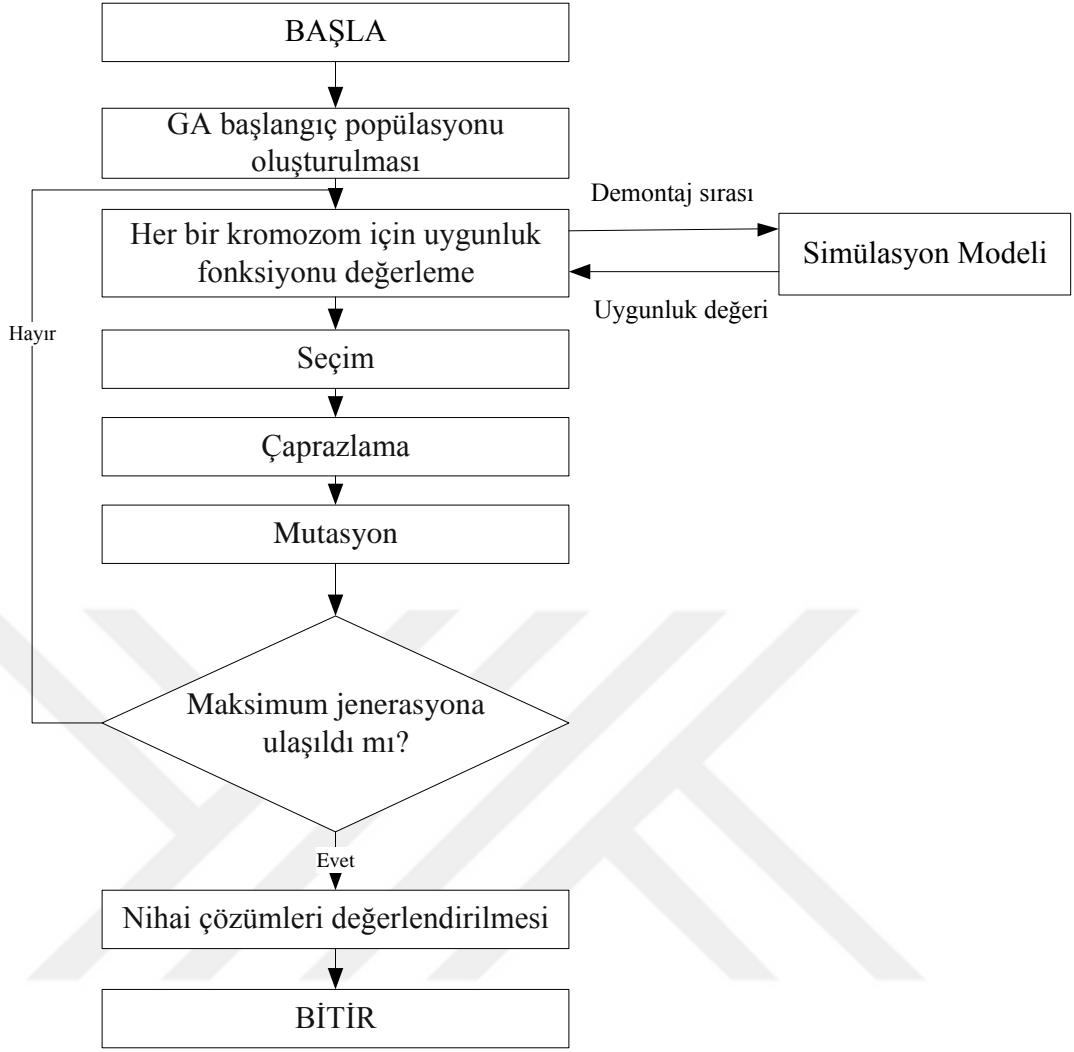
3.3.1 Kromozom Gösterimi

Genetik algoritmalarda, çözümler problemin kısıtlamaları ve özellikleri dikkate alınarak kodlanır ve kromozomlar olarak temsil edilir. Kromozomlar büyük ölçüde tamsayılar, ikili rakamlar, alfabe veya diğer karakterlerin bir kombinasyonu olarak sunulur. Bu çalışmada kullanılan kromozom yapısı Şekil 11'de sunulmuştur.

Şekil 11'deki kromozom, parça numaralarının kombinasyonu ve demontaj görevlerinin sırası olarak kodlanmıştır. Bu kodlama aynı zamanda öncelik ilişkilerini de dikkate alarak oluşturulmuştur.

3.3.2 Başlangıç Popülasyonu

GA başlangıç popülasyonu rasgele kromozomlar oluşturularak elde edilmiştir. Başlangıç popülasyonu oluşturulurken öncelik ilişkileri dikkate alınmıştır.



Şekil 10. Genetik algoritma akış diyagramı

1	8	2	9	13	15	16	14	10	11	6	5	2	3	4	7	17
---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	----

Şekil 11. Kromozomun yapısı

3.3.3 Genetik Operatörler

Genetik algoritmada üç temel operatör kullanılmaktadır: seçim, çaprazlama ve mutasyon. Bu operatörlerin nasıl uygulandığı aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

3.3.3.1 Seçim

Bölüm 2.3.1.4'te seçim yöntemleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu çalışmada ise yeni kromozomları belirlemek için rulet tekerleği seçme yöntemi

uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan uygunluk değerlerinden detaylı olarak Bölüm 3.3.4'te bahsedilmiştir.

3.3.3.2 Çaprazlama

Seçim işleminde kullanılan rulet tekerleği yönteminden sonra çaprazlama işlemi yapılmıştır. Çaprazlama yöntemlerinden de daha önce detaylı olarak bahsedilmiştir. Bu çalışmada ise bu yöntemlerden tek noktalı çaprazlama yöntemi kromozoma uygulanmıştır. Çaprazlama işlemi sonrasında yeniden farklı bir kromozom elde edilir. Elde edilen bu sıra öncelik ilişkilerini dikkate almadan oluşmuş olabilir. Bu durumda “tamir komutu” ile öncelik ilişkilerini dikkate alacak şekilde sıra tekrar oluşturulur.

3.3.3.3 Mutasyon

Mutasyonda temel amaç popülasyondaki kromozom çeşitliliğinin artırılmasıdır. Bu çalışmada literatürde en çok kullanılan mutasyon yöntemlerinden biri olan tek noktalı mutasyon yöntemi kullanılmıştır.

3.3.4 Uygunluk Fonksiyonu

Uygunluk fonksiyonu çalışmanın en önemli aşamalarından birisidir. Zira sonuçların değerlendirilmesi aşamasında dikkat edilmesi gereken ve sonuçlar arasında kıyaslama yapılmasına imkan tanıyan fonksiyondur. Uygunluk fonksiyonu her bir kromozom için simülasyon programı tarafından ayrı ayrı hesaplanmış ve leksiyografik (sıralı) olarak çözülmüştür. Çalışmada kullanılan demontaj hattı dengeleme kriterleri şu şekildedir;

- *Talep*: Yüksek talep seviyesine sahip parçanın mümkün olduğunca en önce demonte edilmesi gerekmektedir. Bu kriter şu şekilde formüle edilmiştir:

$$D = \sum_{z=1}^k (z \cdot d_{SSz}) \quad (1)$$

k parça sayısını göstermektedir ve d_{SSz} ise z . sıradaki parçanın talep değerini göstermektedir. Bu kriter minimize edilmelidir.

- *Yön*: Demontaj işlemi yapılırken her bir yön değiştirme işlemi beraberinde demontaj süresini ve demontaj sürecine zarar verme riskini de arttırmaktadır. Bundan

dolayı demontaj yön değiştirme sayısının da minimize edilmesi gerekmektedir. Bu kriter şu şekilde formüle edilmiştir:

$$DM = \sum_{z=1}^k DM_z \quad DM_z = \begin{cases} 1, & dm_{SS_z} \neq dm_{SS_{z+1}} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (2)$$

k parça sayısını göstermektedir ve dm_{SS_z} ise z . sıradaki parçanın demontaj yönünü göstermektedir (SS_z). Demontaj yönleri şu şekildedir: $r_{SS_z} = \{+1, -1, +2, -2, +3, -3\} = \{+x, -x, +y, -y, +z, -z\}$. Bu kriter minimize edilmelidir.

- *Gelir*: Pahalı parçaların demontaj işlemlerinde hasar görme ihtimalini azaltmak için bu parçalar olduğunca erken demonte edilmelidir. Bu kriter şu şekilde formüle edilmiştir:

$$R = \sum_{z=1}^k (z \cdot r_{SS_z}) \quad (3)$$

k parça sayısını göstermektedir ve r_{SS_z} ise z . sıradaki parçanın gelir değerini göstermektedir (SS_z). Bu kriter minimize edilmelidir.

- *Tehlike*: Tehlikeli parçalar demontaj sürecine olumsuz etki yapabileceği için bu parçaların mümkün olduğunca erken demonte edilmesi gerekmektedir. Bu kriter şu şekilde formüle edilmiştir:

$$H = \sum_{z=1}^k (z \cdot h_{SS_z}) \quad H_z = \begin{cases} 1, & \text{tehlikeli} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (4)$$

k parça sayısını göstermektedir ve h_{SS_z} ise z . sıradaki parçanın tehlikeli olup olmadığını göstermektedir (SS_z). Bu kriter minimize edilmelidir.

- *evrim suresi*: Bu kriter farklı iş yükü seviyelerine sahip istasyonların çevrim sureleri ile ilgilidir. Bu kriter şu şekilde formüle edilmiştir:

$$C = \sum_{z=1}^m (c - t_z)^2 \quad (5)$$

m istasyon sayısı, C çevrim süresi (her bir istasyondaki olabilecek maksimum süre) ve t_z ise z . parçanın demontaj süresini göstermektedir. En küçük C değeri seçilir.

Demontaj hattı dengeleme sürecinin ölçümü için literatürde bazı ölçütler önerilmiştir. Bu ölçütler; hat verimliliği, düzgünlük göstergesi ve denge ölçütüdür. Aşağıda her bir ölçütten bahsedilmiştir:

- *Hat verimliliği*: Hat verimliliği şu şekilde formüle edilmiştir (Elsayed ve Boucher, 1994):

$$\text{Hat Verimliliği (HV)} = \frac{\sum_{i=1}^N ST_i}{N.C} \quad (6)$$

C çevrim süresini, ST_i i . istasyondaki zamanı, N toplam istasyon sayısını göstermektedir. En büyük HV değeri seçilir.

- *Düğünlük göstergesi*: Düğünlük göstergesi şu şekilde formüle edilmiştir (Elsayed ve Boucher, 1994):

$$\text{Düğünlük Göstergesi (DG)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (ST_{max} - ST_i)^2} \quad (7)$$

ST_{max} maksimum istasyon zamanını, ST_i i . istasyondaki zamanı, N toplam istasyon sayısını göstermektedir. En küçük DG değeri seçilir.

- *Denge ölçütü*: Denge ölçütü şu şekilde formüle edilmiştir (McGovern ve Gupta, 2011):

$$\text{Denge Ölçütü (DÖ)} = \sum_{i=1}^N (C - ST_i)^2 \quad (8)$$

C çevrim süresini, ST_i i . istasyondaki zamanı, N toplam istasyon sayısını göstermektedir. En küçük DÖ değeri seçilir.

3.3.5. Tam Faktör Analizi ile Genetik Algoritma Parametrelerinin Analizi

Tam faktör analizinde, değişkenler arasında birbiri ile korelasyonlu olanlar bir kategoriye toplanarak, daha az sayıda faktör elde edilir. Bir başka deyişle, değişken sayısını azaltarak analizi görselleştiren ve yorumlama kolaylığı sağlayan bir yöntemdir.

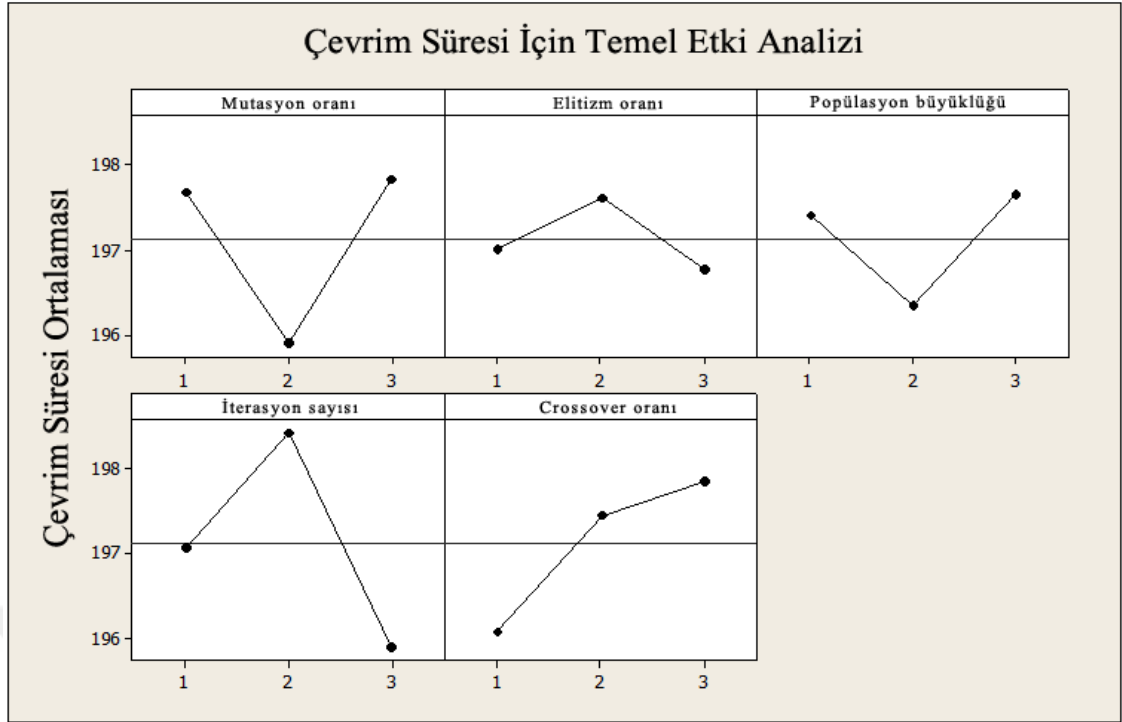
GA parametreleri için uygun değerler GA'nın performansını iyileştirecek şekilde belirlenmelidir. Bu çalışmada beş GA parametresinin (mutasyon oranı, elitizm oranı, popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı ve çaprazlama oranı) belirlenmesi için tam faktör analizi yapılmıştır. Her bir faktör için belirlenen seviye Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Genetik algoritma faktör seviyeleri

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Mutasyon oranı	0.05	0.1	0.2
Elitizm oranı	0.1	0.2	0.3
İterasyon sayısı	250	500	1000
Popülasyon büyüklüğü	10	20	30
Çaprazlama oranı	0.5	0.7	0.9

Tablo 5'e göre beş faktör için üç farklı faktör seviyesi bulunmaktadır. Tam faktör analizinde her bir faktör seviyesi için 10 GA replikasyonu yapılmıştır. Bu durumda toplam 2430 deney yapılmıştır ($3^5 \times 10$). Her bir deneyde simülasyon modeli de beş replikasyon için çalıştırıldığından 12150 simülasyon replikasyonu yapılmıştır (2430×5). Tüm replikasyonların bitmesi sonrasında elde edilen veriler MINITAB programında analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 12'de gösterilmiştir.

Sonuçlar açısından değerlendirildiğinde mutasyon oranı için ikinci seviyedeki faktör, elitizm oranı için üçüncü seviyedeki faktör, popülasyon büyüklüğü olarak ikinci seviyedeki faktör, iterasyon sayısı açısından üçüncü seviyedeki faktör ve çaprazlama oranı açısından ise birinci seviyedeki faktör tam faktör analizine göre bu düzeylerde çevrim süresi minimum olduğu için en uygun sonucu vermiştir.



Şekil 12. GA parametrelerinin MINITAB ile analizi

3.4 TAVLAMA BENZETİMİ TASARIMI

Tavlama benzetimi ile ilgili detaylı bilgi bölüm 2.3.3’de verilmişti. Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan tavlama benzetimi algoritmasının başlangıç sıcaklığı, soğuma oranı ve iterasyon sayısı hakkında bilgi verilmiştir. Sonrasında ise uygunluk fonksiyonu ve tam faktör analizi ile parametrelerin optimize edilmesi hakkında bilgi verilmiştir.

Tavlama benzetimi bu çalışmada simülasyon optimizasyonunda kullanılacak ikinci metasezgisel yöntemdir. Bu yöntemin elde edeceği olurlu bir sıra simülasyon modeline gönderilerek, modelin bir uygunluk fonksiyonu değeri hesaplaması istenmektedir. Bu değer metasezgisel algoritmaya geri gönderilir. Bu döngü yakın uygunluk fonksiyonu değeri elde edilene kadar devam eder. Diğer bir ifadeyle algoritma son bulunduğu değere yakınsak değer bulunduğu ve sonucu iyileştiremediği durumda algoritma sonlanır. Şekil 13’de bu akış hakkında bilgi verilmiştir.

Şekil 13’e göre tavlama benzetimi öncelikle bir başlangıç çözümü oluşturmaktadır. Yeni çözüm ve uygunluk fonksiyonu aşamasında simülasyon optimizasyonuna olurlu bir demontaj sırası göndermektedir. Simülasyon programı bu sıra doğrultusunda çalışarak bir uygunluk fonksiyonu değeri hesaplar ve bunu

tavlama benzetimi algoritmasına geri gönderir. Sonrasında algoritma bu fonksiyon değerinin kabul edilebilir olup olmadığını kontrol eder. Sıcaklığa göre verileri kontrol eder ve durdurma kriteri sağlanıyorsa algoritmayı durdurur. Kriter sağlanmıyorsa yeni çözüm oluşturma aşamasından algoritma tekrar başa döner.

Çalışma kapsamında başlangıç sıcaklığı ve soğuma oranı belirlenmelidir. Bu değerler belirlenirken deney tasarımı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ve elde edilen parametre değerleri bir sonraki bölümde verilmiştir. Tavlama benzetiminde de uygunluk fonksiyonu ölçütleri genetik algoritmada kullanılanlar ile benzerdir. Bu değerler için bölüm 3.3.4'e bakılabilir.

3.4.1. Tam Faktör Analizi ile Tavlama Benzetimi Parametrelerinin Analizi

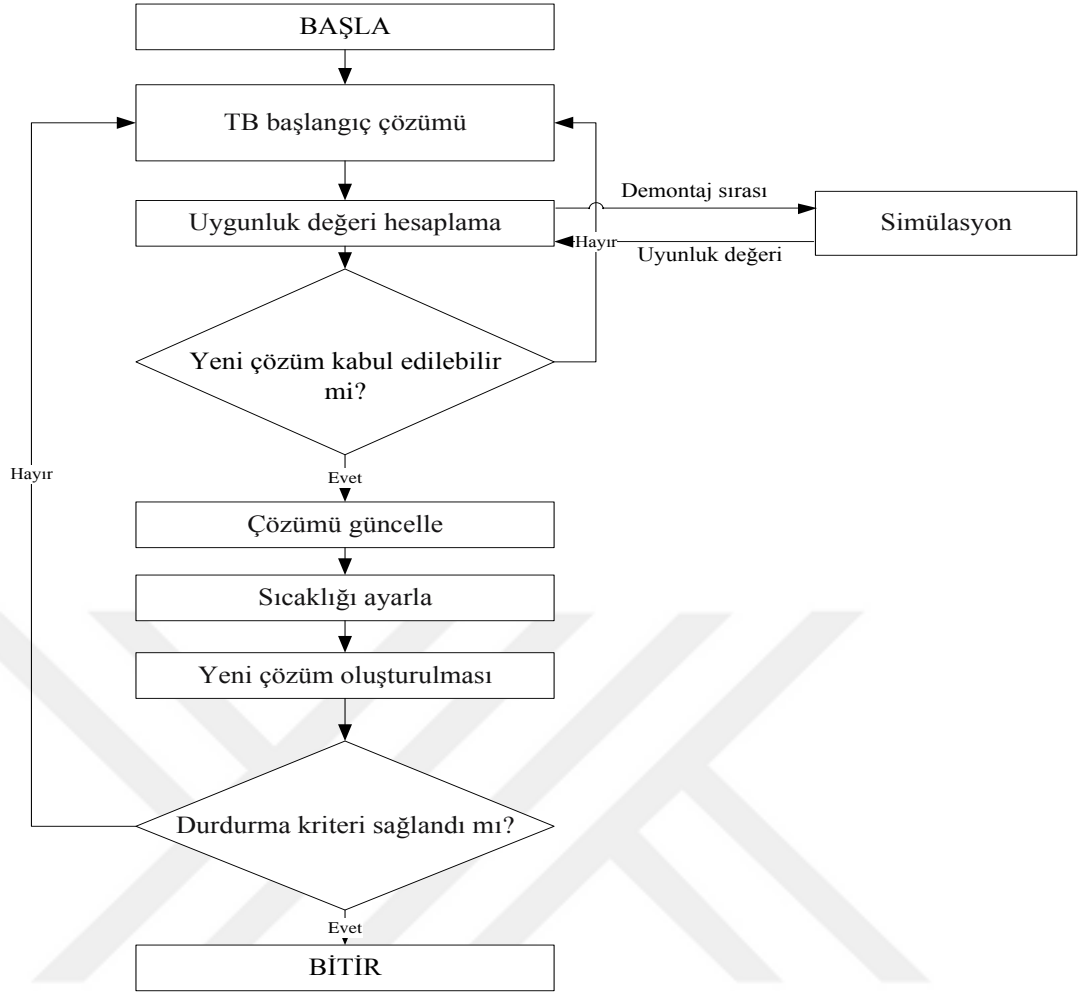
Tavlama benzetiminde en iyi seviyeleri belirleyebilmek doğru sonuca ulaşabilmek açısından önemlidir. Bu nedenle, iki tavlama benzetimi parametresinin (başlangıç sıcaklığı, soğuma oranı) en iyi değerlerini belirlemek için tam faktör analizi uygulanmıştır. Her iki parametre için beş farklı seviye uygulanmıştır. Parametreler ve seviyeleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Tavlama benzetimi parametrelerinin faktör seviyeleri

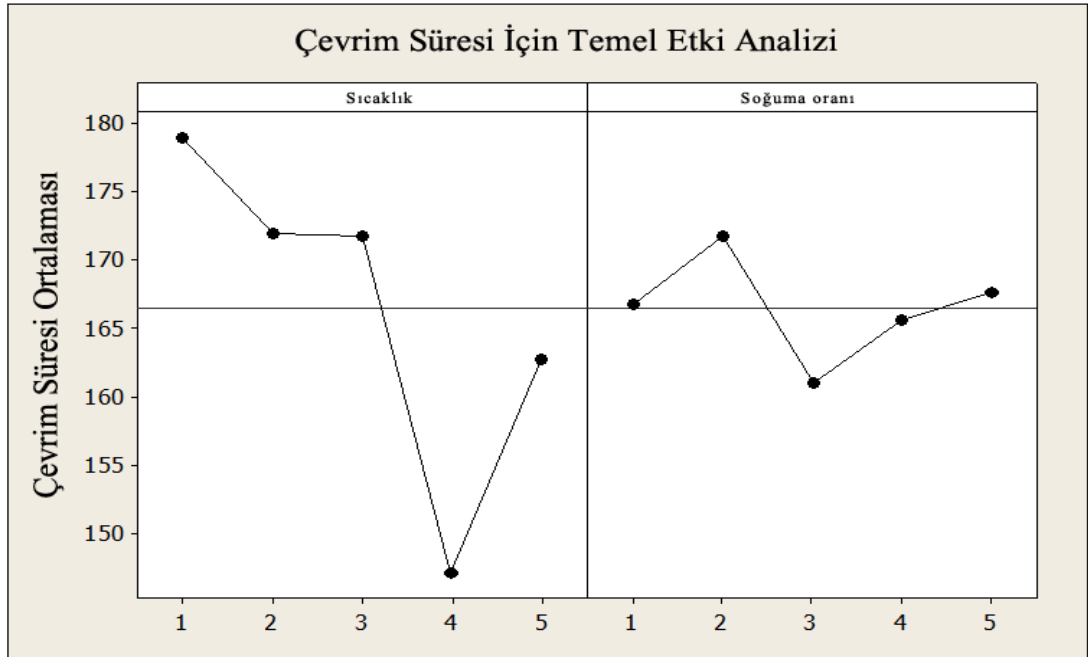
	TB Faktör Seviyeleri				
Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5
Başlangıç sıcaklığı	100	250	500	750	1000
Soğuma oranı	0.01	0.025	0.05	0.075	0.1

Tam faktör analizi için her bir deneyde 10 replikasyon ve toplamda 250 replikasyon yapılmıştır ($5^2 \times 10$). Simülasyon modeli her deney için 5 kez tekrarlandığından, 1250 simülasyon replikasyonu yapılmıştır. Tavlama benzetimi parametreleri tam faktör analizi ile MINITAB programında analiz edilmiş ve sonuç Şekil 14'te gösterilmiştir.

Şekil 14'e bakıldığında belirlenen iki parametre ve beş seviye için, sıcaklık değeri açısından dördüncü seviye ve soğuma oranı açısından ikinci seviyenin çevrim süresini minimum yaptıkları için en uygun seviyeler olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 13. Tavlama benzetimi akış diyagramı



Şekil 14. Tavlama benzetimi parametrelerinin MINITAB ile analizi

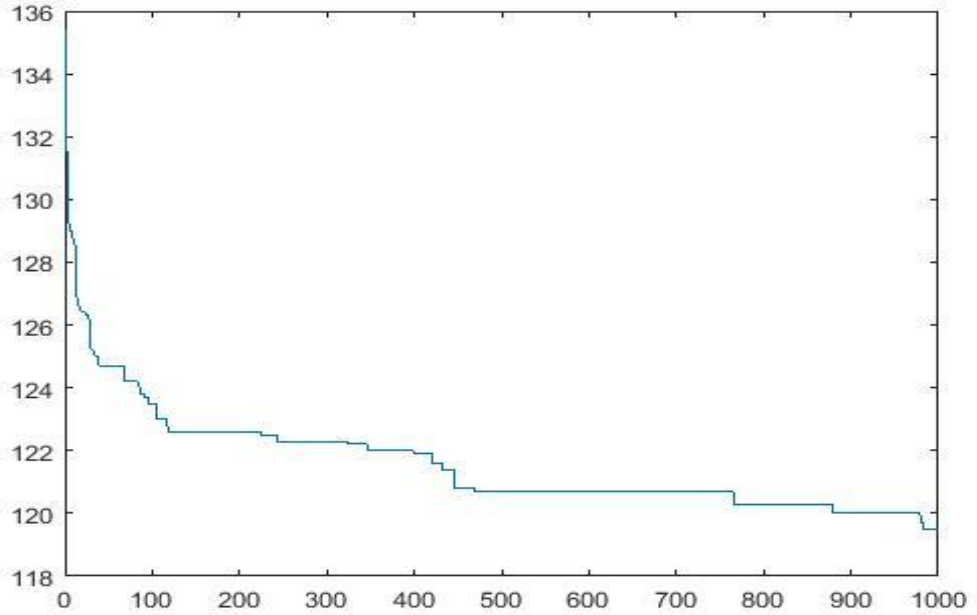
SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç bölümünde genel bir çıkarım yapmak gerekirse, GA MINITAB sonuçları doğrultusunda Tablo 7’de gösterilen parametre değerleri ile tekrar çalıştırılmıştır. GA optimizasyon işlemi, 3.2 GHz Intel Core i5 işlemci ve 8 GB RAM’e sahip bir masaüstü bilgisayar kullanılarak yaklaşık olarak 604.800 sn’de tamamlanmıştır. Çözüm alanının büyüklüğü göz önüne alındığında, GA yaklaşık bir hafta içinde yakınsanmış bir çözüm elde etmiştir.

Tablo 7. GA parametre değerleri

Parametreler	Değer
Mutasyon oranı	0.1
Elitizm oranı	0.3
İterasyon sayısı	1000
Popülasyon büyüklüğü	20
Çaprazlama oranı	0.5

Şekil 15, çevrim süresi için GA yakınsama grafiğini göstermektedir. Bu şekle göre, uygunluk fonksiyonunun ilk değeri 136’dır. Algoritma 100 replikasyondan sonra uygunluk fonksiyonu değeri 122 olan bir çözüme doğru yakınsamıştır. Replikasyon sayısı arttıkça, algoritma 120 olan bir çözüme doğru yakınsamıştır. İlk çözüme kıyasla uygunluk fonksiyonunda% 13 iyileşme görülmüştür.



Şekil 15. GA’nın çevrim süresine göre yakınsama grafiği

GA, tam faktör analizi ile belirlenen değerler ile tekrar çalıştırılmış ve elde edilen çözüm ile ilişkili kromozom şekil 16'da verilmiştir. Bu çözüm, demontaj görevlerinin sırasını 1-12-9-13-5-15-16-14-10-11-6-2-3-4-8-7-17 olarak belirlemiştir. Bu sıralama belirlenirken algoritma öncelik ilişkilerini ve uygunluk fonksiyonunu optimize edecek şekilde dikkate almıştır. Demontaj hattı dengeleme sonucuna göre ise, Tablo 8'de gösterildiği gibi görevler iki istasyona atanmıştır. Bu atamalar Tablo 8'de sunulmuştur.

1	12	9	13	5	15	16	14	10	11	6	2	3	4	8	7	17
---	----	---	----	---	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	----

Şekil 16.GA kromozom gösterimi

Tablo 8. GA parçaların atanması

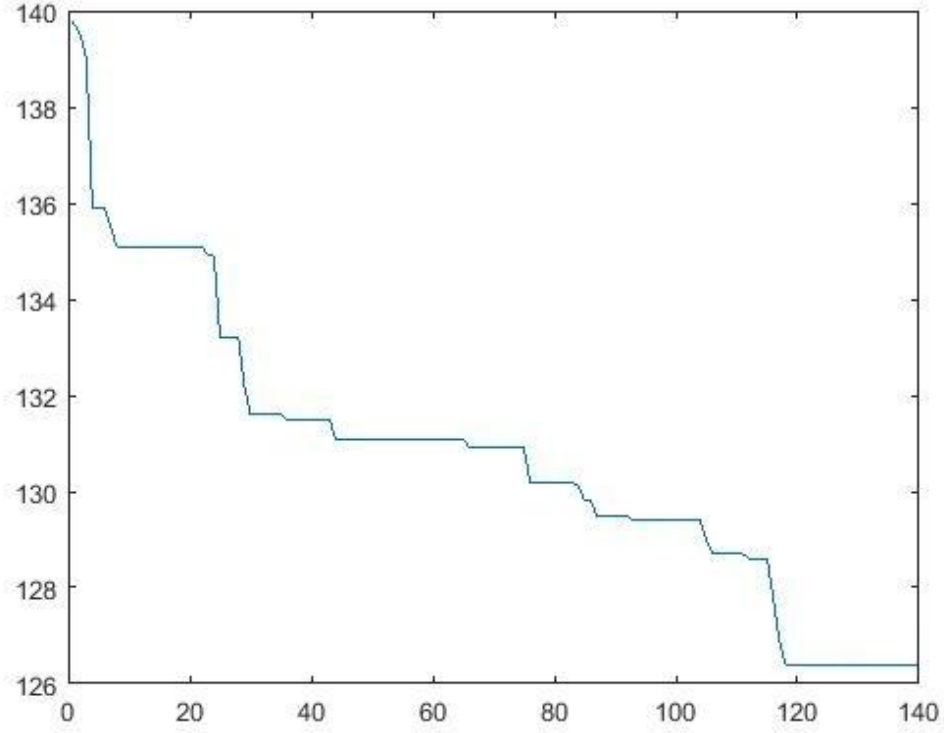
Açılan İstasyonlar	Parçalar
İstasyon 1	1, 7, 12, 9, 8, 6, 17, 3, 4, 13, 5, 2
İstasyon 2	16, 14, 10, 15, 11

TB ise Tablo 9'da sunulan parametre değerleri kullanılarak yürütülmüştür. TB optimizasyon işlemi 64.400 saniyede tamamlanmıştır ve GA optimizasyon sürecinde kullanılan bilgisayar kullanılmıştır. Çözüm uzayının büyüklüğü göz önüne alındığında, TB çok küçük bir hesaplama zamanında yakınsanmış bir çözüm elde etmiştir.

Tablo 9.TB parametre değerleri

Parametreler	Değer
Başlangıç sıcaklığı	750
Soğuma oranı	0.05

Şekil 17, TB için yakınsama grafiğini göstermektedir. Bu şekle göre, uygunluk fonksiyonunun ilk değeri 140'tır, ancak 120 replikasyondan sonra algoritma, uygunluk fonksiyonu değeri 127 olan bir çözüme doğru yakınsamıştır. Bu, uygunluk fonksiyonunda ilk çözüme kıyasla % 10'luk bir iyileşme sağlandığı anlamına gelir.



Şekil 17. TB çevrim süresine göre yakınsama grafiği

Yakınsak çözüm ile ilişkili kromozom gösterimi şekil 18'de verilmiştir. Bu çözüm, demontaj işlerinin sırasını 1-3-12-9-15-6-13-16-14-10-11-5-2-8-7-17-4 olarak belirlemiştir. Bu sıralama belirlenirken algoritma öncelik ilişkilerini ve uygunluk fonksiyonunu optimize edecek şekilde dikkate almıştır. Demontaj hattı dengeleme sonucuna göre, Tablo 10'da gösterildiği gibi işler iki istasyon atanmıştır. İşlerin istasyonlara nasıl atandığı Bölüm 3.2'de bahsedilmiştir.

1	3	12	9	15	6	13	16	14	10	11	5	2	8	7	17	4
---	---	----	---	----	---	----	----	----	----	----	---	---	---	---	----	---

Şekil 18. TB kromozom gösterimi

Tablo 10. TB sonucuna göre parçaların atanması

Açılan İstasyonlar	Parçalar
İstasyon 1	1, 5, 12, 6, 2, 9, 13
İstasyon 2	16, 14, 8, 3, 4, 7, 17, 10, 11

Tablo 11'de görüldüğü gibi uygunluk fonksiyonu değerleri açısından GA ve TB karşılaştırılmıştır. Hat verimliliği açısından iki metasezgisel algoritmanın da aynı sonuçları verdiği görülmüştür. TB algoritması düzgünlük göstergesi, denge ölçütü ve

çevri süresi açısından bu problemde üstünken, GA algoritmasının tehlikeli parça, talep, demontaj yönü ve gelir parametreleri açısından bu problemde üstün olduğu görülmüştür.

Tablo 11.GA ve TB algoritmaları için uygunluk fonksiyon değerlerinin kıyaslanması

	HV (%)	DG	DÖ	H	D	DM	R	C
GA	88.1	15.6	4887	10	4200	9	1890	21.2
TB	88.1	10.2	4746	11	4850	16	2085	17,1

Demontaj hattını dengelemek için çevrim süresi toplam sürelerin ortalaması alınarak hesaplandı ve bu problemde iki olan minimum istasyonlara göre görevler atanmıştır. İki optimizasyon algoritması görevleri iki farklı istasyona atamıştır ancak atanan bazı görevlerin yerleri iki algortmada farklılık göstermiştir.

Genel bir çıkarım yapmak gerekirse, demontaj hattı dengeleme, istasyonlara iş atarken öncelik ilişkileri sağlamak ve performans ölçütlerini optimize etmek olarak tanımlanır. İş istasyonu sayısını en aza indirme hedefinin yanında, zararlı parçaların ve yüksek talepli parçaların erken demonte edilmesi ve demontaj yönü değişikliklerinin en aza indirilmesi gibi hedefler göz önünde bulundurulmaktadır. Demontaj hattı dengeleme problemlerini çözmek için literatürde farklı tür çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmaların çoğunda demontaj sürelerinin deterministik olduğu varsayılmaktadır. Demontaj sürelerinin genelde stokastik olması ihmal edilmiştir. Bu çalışmada stokastik değerlere odaklanmak için simülasyon tabanlı GA ve TB demontaj hattı dengeleme yöntemi önerilmiştir. Bu simülasyon modeli çözüm alternatiflerinin uygunluk değerlerini belirlemek için GA ile entegre edilmiştir. Demontaj görevlerinin sırası, görev atamaları ile birlikte, yakınsanmış GA çözümüne göre belirlenmiştir. Son olarak, çözüm alternatiflerinin uygunluk değerlerini belirlemek için simülasyon modeli TB ile entegre edilmiştir. Sıra ve görev atamaları TB çözümüne göre belirlenmiştir. Son aşamada GA ve TB algoritmalarının performans ölçütlerine göre sonuçları karşılaştırılmıştır.

GA ve TB metasezgisel algoritmaları simülasyon optimizasyonu için sıklıkla kullanılan güçlü algoritmalar olmasına rağmen, simülasyon optimizasyonunda kullanılabilecek başka birçok metasezgisel algoritma vardır. Gelecekteki çalışmalarda GA ve TB sonuçları, tabu arama ve karınca koloni optimizasyonu

metodolojileri ile aynı sorunu çözümlenerek karşılaştırılabilir. Çalışma süreleri ve görev süreleri çalışmada stokastik kabul edilmiştir. Hattaki arızalar gibi farklı stokastik süreçler gelecek çalışma olarak dikkate alınabilir ve kesikli olay simülasyonu yerine sistem dinamik simülasyonu kullanılabilir. Ayrıca, işletmeler açısından bir kombi demontaj hattına uygulanan bu yöntem farklı işletmelerde farklı ürünlerin demontaj işlemlerine de uygulanabilir. Bu yöntemin uygulanması ile birlikte işletmeler ürünlerinin geri dönüşümü ile bozulmamış ve yeniden kullanılabilir ürünlerin geri dönüşümünü sağlayarak yüksek oranda karlılık elde edebilirler.



KAYNAKÇA

Agrawal, S. ve Tiwari, M.K. (2008). *A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem*. International Journal of Production Research 46(6), 1405-1429.

Alanjari, P., Razavi Alavi, S. ve AbouRizk, S. (2014). *Material and facility layout planning in construction projects using simulation*. In Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014 (pp. 3388-3398). IEEE.

Alrefaei, M. H., ve Diabat, A. H. (2009). *A simulated annealing technique for multi-objective simulation optimization*. Applied mathematics and computation, 215(8), 3029-3035.

Altekin, F. T. (2017). *A Comparison of Piecewise Linear Programming Formulations for Stochastic Disassembly Line Balancing*. International Journal of Production Research 55 (24): 7412–7434. doi: 10.1080/00207543.2017.1351639.

Altekin, F. T., ve C. Akkan. (2012). *Task-Failure-Driven Rebalancing of Disassembly Lines*. International Journal of Production Research 50 (18): 4955–4976.

Altekin, F. T., L. Kandiller, ve N. E. Ozdemirel. (2008). *Profit-Oriented Disassembly-Line Balancing*. International Journal of Production Research 46 (10): 2675–2693.

Altekin, F. T., Bayındır Z. P. ve V. Gümüşkaya. (2016). *Remedial Actions for Disassembly Lines with Stochastic Task times*. Computers and Industrial Engineering 99: 78–96.

Amaran, S., Sahinidis, N. V., Sharda, B. ve Bury, S. J. (2015). *Simulation optimization: a review of algorithms and applications*. Annals of Operations Research, 240(1), 351-380.

Ameli, M., Mansour, S. ve Ahmadi J. A. (2019). *A simulation-optimization model for sustainable product design and efficient end-of-life management based on individual producer responsibility*. Resources, Conservation and Recycling, 140, 246-258.

Amiri, M., ve Mohtashami, A. (2012). *Buffer allocation in unreliable production lines based on design of experiments, simulation, and genetic algorithm*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62(1-4), 371-383.

Andradottir, S. (1998). *A review of simulation optimization techniques*. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 151-158.

April, J., Glover, F., Kelly, J.P., ve Laguna, M. (2003). *Practical introduction to simulation optimization*. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 71-78.

Avcı, Y., (2008). *Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniğinde Benzetilmiş Tavlama Algoritması Kullanılarak Mekanik Sistemlerde Hasar Tespiti*. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 64s.

Avikal, S., ve P. K. Mishra. (2012). *A New U-Shaped Heuristic for Disassembly Line Balancing Problems*, *Pratibha: International Journal of Science, Spirituality, Business and Technology* 1 (1): 21–27.

Avikal, S., R. Jain, ve P. Mishra. (2013a). *A Heuristic for U-Shaped Disassembly Line Balancing Problems*. MIT International Journal of Mechanical Engineering 3 (1): 51–56.

Avikal, S., P. K. Mishra, ve R. Jain. (2013b). *An AHP and PROMETHEE Methods-Based Environment Friendly Heuristic for Disassembly Line Balancing Problems*. Interdisciplinary Environmental Review 14 (1): 69–85.

Avikal, S., P. K. Mishra, R. Jain, ve H. C. Yadav. (2013c). *A PROMETHEE Method Based Heuristic for Disassembly Line Balancing Problem*. Industrial Engineering and Management Systems 12 (3): 254–263.

Avikal, S., P. K. Mishra, ve R. Jain. (2014a). *A Fuzzy AHP and PROMETHEE Method-Based Heuristic for Disassembly Line Balancing Problems*. International Journal of Production Research 52 (5): 1306–1317.

Avikal, S., R. Jain, ve P. K. Mishra. (2014b). *A Kano Model, AHP and M-TOPSIS Method-Based Technique for Disassembly Line Balancing under Fuzzy Environment*. Applied Soft Computing (25): 519–529.

Aydemir K. ve Turkbey, A. (2013). *Multi-objective optimization of stochastic disassembly line balancing with station paralleling*. Computers & Industrial Engineering 65(3), 413-425.

Azadivar, F. (1999). *Simulation optimization methodologies*. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 93-100.

Azadivar, F. ve J. Wang. (2000). *Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms*. International Journal of Production Research, 38(17), pp. 4369–4383, 2000.

Bentaha, M. L., O. Battaïa, ve A. Dolgui. (2014c). *A Sample Average Approximation Method for Disassembly Line Balancing Problem under Uncertainty*. Computers and Operations Research (51): 111–122.

Bentaha, M. L., O. Battaïa, ve A. Dolgui. (2015a). *An Exact Solution Approach for Disassembly Line Balancing Problem under Uncertainty of the Task Processing times*. International Journal of Production Research 53 (6): 1807–1818.

Bentaha, M. L., O. Battaïa, A. Dolgui, ve S. J. Hu. (2015b). *Second Order Conic Approximation for Disassembly Line Design with Joint Probabilistic Constraints*. European Journal of Operational Research 247 (3): 957–967.

Boltzmann, L., (1866) *Über die Mechanische Bedeutung des Zweiten Hauptsatzes der Warmetheorie*. Wiener Berichte, 53, 195-220, Vol 1.

Carson, Y. ve Maria, A., (1997). *Simulation optimization: methods and applications*. In Proceedings of the 29th conference on Winter simulation, 118-126.

De Jong, K.,A. (1993). *Genetic algorithms are NOT function optimizers*. In D.Whitley (Eds.), *Foundations of Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann, SanMateo, CA, 5–18.

Deniz, N., ve Ozcelik, F. (2019). *An extended review on disassembly line balancing with bibliometric & social network and future study realization analysis*. *Journal of Cleaner Production* 225, 697-715.

Ding, L.-P., Feng, Y.-X., Tan, J.R., Gao ve 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(5-8), 761-771.

Ding, H., Benyoucef, L., ve Xie, X. (2008). *Simulation-based evolutionary multi-objective optimisation approach for integrated decision-making in supplier selection*. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 31(3-4), 144-157.

Dowsland, K.A., (1995). *Simulated Annealing*. In: *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. (Editor, Reeves, C.R.), McGraw-Hill.

Duflou, J.R., Seliger, G., Kara, S., Umeda, Y., Ometto, A. And Willems, B., (2008). *Efficiency and feasibility of product disassembly: A case- based study*, *CIRPAnnals-Manufacturing Technology*, 57: 583- 600.

Edis, E., Ilgin, M. A. ve Edis R., (2019). *Disassembly Line Balancing with Sequencing Decisions: A Mixed Integer Linear Programming Model and Extensions*, *Journal of Cleaner Production* 238 (2019): 117826.

Eglese, R.W., (1990). *Simulated Annealing: A Tool for Operational Research*. *European Journal of Operational Research*, 34: 600-612.

Elsayed, E. A., ve Boucher, T. O. (1994). *Analysis and Control of Production Systems*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Fang, Y., Liu, Q., Li, M., Laili, Y. ve Pham, D.T. (2019). *Evolutionary many-objective optimization for mixed-model disassembly line balancing with multi-robotic workstations*. *European Journal of Operational Research*, 276(1), 160-174.

Fontanili, F., Vincent, A. ve Ponsonnet, R. (2000). *Flow simulation and genetic algorithm as optimization tools*. *International Journal of Production Economics*, 64(1-3), 91-100.

Fu, M. (2002). *Optimization for simulation: theory vs. practice*. *INFORMS Journal On Computing*, 14 (3), 192-215.

Gen, M., ve Cheng R. (1997). *Genetic Algorithms and Engineering Design*. NewYork: John Wiley and Sons.

Glover, F. ve Kochenberger, G.A. (2002). *Handbook of metaheuristics*. Boston:Kluwer Academic Publishers.

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in search optimization & machine learning*. Addison Wesley Longman, Inc.

Goldberg, D. E. (2002). *Design of innovation: Lessons from and for competent genetic algorithms*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers.

Güçdemir, H., ve Selim, H. (2017). *Customer centric production planning and control in job shops: A simulation optimization approach*. *Journal of Manufacturing Systems*, 43, 100-116.

Güngör, A., ve Gupta S. M. (1999). *Issues in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery: A Survey*. *Computers and Industrial Engineering* 36: 811–853.

Güngör, A., ve S. M. Gupta. (2001). *A Solution Approach to the Disassembly Line Balancing Problem in the Presence of Task Failures*. International Journal of Production Research 39 (7): 142–1467.

Güngör, A., ve S. M. Gupta. (2002). *Disassembly Line in Product Recovery*. International Journal of Production Research 40 (10): 2569–2589.

Hezer, S., ve Y. Kara. (2015). *A Network-Based Shortest Route Model for Parallel Disassembly Line Balancing Problem*. International Journal of Production Research 53 (6): 1849–1865.

Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.

Igarashi, K., T. Yamada, ve M. Inoue. (2014). *2-Stage Optimal Design and Analysis for Disassembly System with Environmental and Economic Parts Selection Using the Recyclability Evaluation Method*. Industrial Engineering and Management Systems 13 (1): 52–66.

Igarashi, K., T. Yamada, S. M. Gupta, M. Inoue, ve N. Itsubo. (2016). *Disassembly System Modeling and Design with Parts Selection for Cost, Recycling and CO2 Saving Rates Using Multi Criteria Optimization*. Journal of Manufacturing Systems, (38): 151–164.

Ilgin, M. A., ve Tunali, S. (2007). *Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 34(5-6), 594-604.

Ilgin, M. A., ve Taşoğlu, G. T. (2016). *Simultaneous determination of disassembly sequence and disassembly-to-order decisions using simulation optimization*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 138(10).

Ilgin, M. A., H. Akçay, ve C. Araz. (2017). *Disassembly Line Balancing Using Linear Physical Programming*. International Journal of Production Research 55 (20): 6108–6119.

Ilgin, M. A. (2019). *A DEMATEL-Based Disassembly Line Balancing Heuristic*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 141 (2), 021002.

Jalali, H., ve Nieuwenhuyse, I. V. (2015). *Simulation optimization in inventory replenishment: a classification*, IIE Transactions, 47(11), 1217-1235.

Jayaraman, V., (2006). *Production planning for closed-loop supply chains with product recovery and reuse: an analytical approach*, International Journal of Production Research, 44 (5): 981- 998.

Ju, X., ve Liu, F. (2019). *Wind farm layout optimization using self-informed genetic algorithm with information guided exploitation*. Applied Energy, 248, 429-445.

Kang, P. S., ve Bhatti, R. S. (2018). *Continuous process improvement implementation framework using multi-objective genetic algorithms and discrete event simulation*. Business Process Management Journal.

Kalayci, C. B., ve S. M. Gupta. (2013a). *A Particle Swarm Optimization Algorithm with Neighborhood-Based Mutation for Sequence-Dependent Disassembly Line Balancing Problem*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 69 (1–4): 197–209.

Kalayci, C. B., ve S. M. Gupta. (2013b). *Ant Colony Optimization for Sequence-Dependent Disassembly Line Balancing Problem*. Journal of Manufacturing Technology Management 24 (3): 413–427.

Kalayci, C. B., ve S. M. Gupta. (2013c). *Artificial Bee Colony Algorithm for Solving Sequence-Dependent Disassembly Line Balancing Problem*. Expert Systems with Applications 40 (18): 7231–7241.

Kalayci, C. B., ve S. M. Gupta. (2013d). *Balancing a Sequence-Dependent Disassembly Line Using Simulated Annealing Algorithm*. Applications of Management Science 16: 81–103.

Kalayci, C. B., ve S. M. Gupta. (2014). *A Tabu Search Algorithm for Balancing a Sequence-Dependent Disassembly Line*. Production Planning and Control 25 (2): 149–160.

Kalayci, C. B., O. Polat, ve S. M. Gupta. (2015a). *A Variable Neighbourhood Search Algorithm for Disassembly Lines*. Journal of Manufacturing Technology Management 26 (2): 182–194.

Kalayci, C. B., A. Hancilar, A. Gungor, ve S. M. Gupta. (2015b). *Multi-Objective Fuzzy Disassembly Line Balancing Using a Hybrid Discrete Artificial Bee Colony Algorithm*. Journal of Manufacturing Systems 37 (3): 672–682.

Kalaycilar, E. G., M. Azizoğlu, ve S. Yeralan. (2016). *A Disassembly Line Balancing Problem with Fixed Number of Workstations*. European Journal of Operational Research 249 (2): 592–604.

Kendall, G., (2016). *AI Methods [online]*, <http://www.cs.nott.ac.uk/~pszgk/aim/notes/simulatedannealing.doc>.

Kerr, W. ve Ryan, C. (2001). *Eco-efficiency gains from remanufacturing: A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia*, Journal of Cleaner Production, 9 (1) : 75-81.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. ve Vecchi, M. P., (1983). *Optimization by Simulated Annealing*, Science, 220(4598), 671–680.

Koç, A., I. Sabuncuoğlu. ve E. Erel. (2009). *Two Exact Formulations for Disassembly Line Balancing Problems with Task Precedence Diagram Construction Using an and/or Graph*. IIE Transactions 41 (10): 866–881.

Köchel, P. ve Nilander, U., (2005). *Simulation-Based Optimisation Of Multi Echelon Inventory Systems*, Int.J. Production Economics, Volume: 93-94, s: 505-513.

Lacksonen, T. (2001). *Empirical comparison of search algorithms for discrete event simulation*. Computers & Industrial Engineering, 40(1-2), 133-148.

Leung, C. S., ve Lau, H. Y. (2018). *Multiobjective simulation-based optimization based on artificial immune systems for a distribution center*. Journal of Optimization.

Lin FT, Kao CY ve Hsu CC. (1993). *Applying the genetic approach to simulated annealing in solving some NP-hard problems*. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics;23(6):1752}67.

Lin, Y. K., ve Chen, H. C. (2015). *Bicriteria scheduling problem for unrelated parallel machines with release dates*. Computers & Operations Research, 64, 28-39.

Lin, R. C., Sir, M. Y., ve Pasupathy, K. S. (2012). *Multi-objective simulation optimization using data envelopment analysis and genetic algorithm: Specific application to determining optimal resource levels in surgical services*. Omega, 41(5), 881-892.

Liu, J., Zhou, Z., Pham, D.T., Xu, W., Yan, J., Liu, A., Ji, C. ve Liu, Q. (2018). *An improved multi objective discrete bees algorithm for robotic disassembly line balancing problem in remanufacturing*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 97(9), 3937-3962.

Magoulas, G. D., Eldabi, T., ve Paul, R. J. (2002). *Global search strategies for simulation optimisation*. In Proceedings of the Winter Simulation Conference (Vol. 2, pp. 1978-1985). IEEE.

Mattila, V., ve Virtanen, K. (2015). *Ranking and selection for multiple performance measures using incomplete preference information*. European Journal of Operational Research, 242(2), 568-579.

Mete, S., Z. A. Çil, K. Ağpak, E. Özceylan, ve Dolgui, A. (2016). *A Solution Approach Based on Beam Search Algorithm for Disassembly Line Balancing Problem*. *Journal of Manufacturing Systems* 41 (1): 188–200.

McGovern, S. M., ve S. M. Gupta. (2003). *2-opt Heuristic for the Disassembly Line Balancing Problem*. In *Proceedings of the SPIE International Conference on Environmentally Conscious Manufacturing III*, 71–84, Providence, Rhode Island, October 29–30.

McGovern, S. M., ve Gupta S. M. (2005a). *Local Search Heuristics and Greedy Algorithm for Balancing a Disassembly Line*. *The International Journal of Operations and Quantitative Management* 11 (2): 91–114.

McGovern, S. M., ve Gupta S. M. (2006a). *Ant Colony Optimization for Disassembly Sequencing with Multiple Objectives*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 30 (5–6): 481–496.

McGovern, S. M., ve Gupta S. M. (2007a). *A Balancing Method and Genetic Algorithm for Disassembly Line Balancing*. *European Journal of Operational Research* 179 (3): 692–708.

McGovern, S. M., ve Gupta S. M. (2007b). *Combinatorial Optimization Analysis of the Unary NP-Complete Disassembly Line Balancing Problem*. *International Journal of Production Research* 45 (18–19): 4485–4511.

McGovern, S. M., ve Gupta, S. M. (2011). *The Disassembly Line: Balancing and Modeling*, McGraw-Hill, New York.

McGovern, S. M., ve S. M. Gupta. (2015). *Unified Assembly- and Disassembly-Line Model Formulae*. *Journal of Manufacturing Technology Management* 26 (2): 195–212.

Olafson, S., ve Kim, J. (2002). *Simulation optimization*. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 79–84.

Özcan, Y. A., Tànfani, E., ve Testi, A. (2017). *Improving the performance of surgery-based clinical pathways: a simulation-optimization approach*. Health care management science, 20(1), 1-15.

Özceylan, E., ve Paksoy, T. (2013). *Reverse Supply Chain Optimisation with Disassembly Line Balancing*. International Journal of Production Research 51 (20): 5985–6001.

Özceylan, E., ve Paksoy, T. (2014a). *Fuzzy Mathematical Programming Approaches for Reverse Supply Chain Optimization with Disassembly Line Balancing Problem*. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems 26 (4): 1969–1985.

Özceylan, E. ve Paksoy, T. (2014b). *Interactive Fuzzy Programming Approaches to the Strategic and Tactical Planning of a Closed-Loop Supply Chain under Uncertainty*. International Journal of Production Research 52 (8): 2363–2387.

Özceylan, E., T. Paksoy, ve T. Bektaş. (2014). *Modeling and Optimizing the Integrated Problem of Closed-Loop Supply Chain Network Design and Disassembly Line Balancing*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 61: 142–164.

Özceylan, E., Kalayci, C. B., Güngör, A., ve Gupta, S. M. (2018). *Disassembly line balancing problem: a review of the state of the art and future directions*. International Journal of Production Research, 1-23.

Paksoy, T., A. Güngör, E. Özceylan, ve Hancilar, A. (2013). *Mixed Model Disassembly Line Balancing Problem with Fuzzy Goals*. International Journal of Production Research 51 (20): 6082–6096.

Pham, D.T., ve Karaboga, D. (2000). *Intelligent Optimisation Techniques*, New York: Springer.

Ren, Y., D. Yu, C. Zhang, G. Tian, L. Meng, ve X. Zhou. (2017). *An Improved Gravitational Search Algorithm for Profit-Oriented Partial Disassembly Line*

Balancing Problem. International Journal of Production Research 55 (24): 7302–7316. doi:10.1080/00207543.2017.1341066.

Rao, S. S. (2009). *Engineering Optimization: Theory and Practice*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470549124>

Rosen, S. L., ve Harmonosky, C. M. (2005). *An improved simulated annealing simulation optimization method for discrete parameter stochastic systems*. Computers & Operations Research, 32(2), 343-358.

Seidi, M., ve S. Saghari. (2016). *The Balancing of Disassembly Line of Automobile Engine Using Genetic Algorithm (GA) in Fuzzy Environment*. Industrial Engineering and Management Systems 15 (4): 364–373.

Smith, D.E. (1973). *An empirical investigation of optimum-seeking in computer simulation situation*. Operations Research, 21(2), 475–497.

Tasoglu, G., ve Yildiz, G. (2019). *Simulated annealing based simulation optimization method for solving integrated berth allocation and quay crane scheduling problems*. Simulation Modelling Practice and Theory, 97, 101948.

Tekin, E., ve Sabuncuoglu, I. (2004). *Simulation optimization: A comprehensive review on theory and applications*. IIE Transactions, 36, 1067-1081.

Thierry, M., Salomon, M., Van N. J. ve Van W. L. (1995). *Strategic issues in product recovery management*, Calif. Manage. Rev., 37: 114–135.

Yin, P. Y., Wu, T. H., ve Hsu, P. Y. (2017). *Simulation based risk management for multi-objective optimal wind turbine placement using MOEA/D*. Energy, 141, 579-597.

Tuncel, E., Zeid, A. ve Kamarthi, S., (2014). *Solving large scale disassembly line balancing problem with uncertainty using reinforcement learning*. Journal of Intelligent Manufacturing 25(4), 647- 659.

Zeng, Q., Diabat, A., ve Zhang, Q. (2015). *A simulation optimization approach for solving the dual-cycling problem in container terminals*. Maritime Policy & Management, 42(8), 806-826.

Zhang, Z., K. Wang, L. Zhu, ve Y. Wang. (2017). *A Pareto Improved Artificial Fish Swarm Algorithm for Solving a Multi-Objective Fuzzy Disassembly Line Balancing Problem*. Expert Systems with Applications 86 (1): 165–176.

Zhu, L., Zhang, Z. ve Wang, Y. (2018). *A Pareto firefly algorithm for multi-objective disassembly line balancing problems with hazard evaluation*. International Journal of Production Research 56(24), 7354-7374.

Wang, Y., Bu, G., Wang, Y., Zhao, T., Zhang, Z., ve Zhu, Z. (2016). *Application of a simulated annealing algorithm to design and optimize a pressure-swing distillation process*. Computers & Chemical Engineering, 95, 97-107.

Wang, K., Li, X., Gao, L. (2019a). *Modeling and optimization of multi-objective partial disassembly line balancing problem considering hazard and profit*. Journal of Cleaner Production 211, 115-133.

Wang, S., Guo, X., Liu, J., (2019b). *An efficient hybrid artificial bee colony algorithm for disassembly line balancing problem with sequence-dependent part removal times*. Engineering Optimization, 1-18.

Xiao, S., Wang, Y., Yu, H., Nie, S., (2017). *An Entropy-Based Adaptive Hybrid Particle Swarm Optimization for Disassembly Line Balancing Problems*. Entropy 19(11), 596.