

**T.C.
HASAN KALYONCU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**BULANIK TALEP ALTINDA
BÜTÜNLEŞİK TOPLAMA-DEMONTAJ-DAĞITIM PROBLEMİ**

YUSUF BAYHAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GAZİANTEP- 2025



LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS TEZ KABUL VE ONAY FORMU

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı öğrencisi YUSUF BAYHAN tarafından hazırlanan “BULANIK TALEP ALTINDA BÜTÜNLEŞİK TOPLAMA-DEMONTAJ-DAĞITIM PROBLEMİ” başlıklı tez, 21/07/2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucu **başarılı** bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

<u>Görevi</u>	<u>Unvanı, Adı ve Soyadı</u>	<u>Kurumu/Üniversitesi</u>	<u>İmzası:</u>
Jüri Başkanı / Tez Danışmanı	Dr. Öğr. Üyesi Zülal DİRİ KENER	Gaziantep Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Jamil HALLAK	Hasan Kalyoncu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Betül YILDIRIM	Hasan Kalyoncu Üniversitesi	

Bu tez Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Ufuk AKBAŞ
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

YUSUF BAYHAN

Tarih:

HASAN KALYONCU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BULANIK TALEP ALTINDA
BÜTÜNLEŞİK TOPLAMA-DEMONTAJ-DAĞITIM PROBLEMİ

YUSUF BAYHAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi ZÜLAL DİRİ KENGER
İkinci danışman
Doç. Dr. ZEYNEL ABİDİN ÇİL

ÖZET

Bu tez çalışması, teknolojik gelişmeler, hızlı kentleşme ve değişen tüketim alışkanlıkları sonucu artan elektronik atık problemine odaklanmaktadır. Sürdürülebilir çevre ve ekonomik kazanımlar için atık yönetiminin önemini vurgulayan çalışma, ömrünü tamamlamış elektronik ürünler için bulanık talep koşulları altında bütünleşik bir toplama, demontaj ve dağıtım problemi modelini ele almaktadır. Tezin temel amacı; toplama, demontaj ve talep merkezlerini içeren bir tersine tedarik zinciri ağını, taleplerin belirsizliği ortamında optimize etmektir. Bu optimizasyon, hem demontaj hattındaki iş istasyonu maliyetlerini hem de lojistik süreçlerdeki nakliye maliyetlerini eş zamanlı olarak en aza indirmeyi hedeflemektedir. Probleme çözüm sunması amacıyla karma tamsayılı matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu model, toplama ve dağıtım aşamaları için Araç Rotalama Problemi (ARP) yaklaşımını, demontaj süreci için ise Demontaj Hattı Dengeleme (DHD) prensiplerini incelemiştir. Geliştirilen modelin etkinliği, önce örnek problemler ve ardından rassal olarak üretilmiş veriler üzerinde test edilerek modelin sınırları belirlenmiş ve parametrelerin model üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Geliştirilen model örnek problemler üzerinde hipotetik veriler üretilerek test edilmiş ve analizler yapılmıştır. Son olarak yapılan çeşitli analizler ile parametrelerin model üzerindeki etkinliği tartışılmıştır. Bu çalışma ile tersine tedarik zincirlerindeki belirsizlik yönetimine ve elektronik atık yönetimi literatürüne önemli bir bilimsel katkı sağlanması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Demontaj Hattı Dengeleme, Araç Rotalama Problemi, Matematiksel Model, Bulanık Mantık.

**HASAN KALYONCU UNIVERSITY
GRADUATE EDUCATION INSTITUTE
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING**

**INTEGRATED COLLECTION-DISASSEMBLY-DISTRIBUTION
PROBLEM UNDER FUZZY DEMAND**

YUSUF BAYHAN

MASTER THESIS

**Advisor
Asst. Prof. Dr. ZÜLAL DİRİ KENGER
Co-advisor
Doç. Dr. ZEYNEL ABİDİN ÇİL**

ABSTRACT

This thesis focuses on the increasing problem of electronic waste due to technological developments, rapid urbanization and changing consumption habits. Emphasizing the importance of waste management for sustainable environment and economic gains, the study considers an integrated collection, disassembly and distribution problem model for end-of-life electronic products under fuzzy demand conditions. The main objective of the thesis is to optimize a reverse supply chain network including picking, disassembly and demand centers in an uncertain demand environment. This optimization aims to simultaneously minimize both the workstation costs in the disassembly line and the transportation costs in the logistics processes. A mixed integer mathematical model is developed to provide a solution to the problem. This model examines the Vehicle Routing Problem (VRP) approach for the picking and distribution phases and the principles of Dismantling Line Balancing (DLB) for the disassembly process. The effectiveness of the developed model is tested first on sample problems and then on randomly generated data to determine the limits of the model and to analyze the effects of parameters on the model. The developed model was tested by generating hypothetical data on sample problems and analyzed. Finally, the effectiveness of the parameters on the model is discussed through various analyses. This study aims to make a significant scientific contribution to the literature on uncertainty management in reverse supply chains and electronic waste management.

Keywords: Disassembly Line Balancing, Vehicle Routing Problem, Mathematical Model, Fuzzy Logic.

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında yoğun akademik çalışmalarına rağmen ihtiyaç duyduğum her an ulaşabildiğim, yapmış olduğum bu çalışmanın titizlikle takipçisi olan, öğretici öneri ve eleştirileri ile yol gösteren, tecrübe, deneyim ve görüşlerini örnek aldığım, tezi bitirmem için beni sürekli teşvik eden danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Zülal DİRİ KENGER'e göstermiş olduğu sabır, emek ve yakın ilgiden dolayı teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca yardımcı danışman Doç. Dr. Zeynel Abidin ÇİL hocama, jüri üyeliği görevini üstlenen kıymetli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Jamil HALLAK ve Dr. Öğr. Üyesi Betül YILDIRIM'a göstermiş oldukları ilgi, anlayış ve destekleri için teşekkürlerimi sunarım. Farklı bir bölümde olmasına rağmen yüksek lisans eğitimi sürecimi takip eden, sağlık sorunlarım nedeniyle yorulduğum noktalarda şahsımı motive eden ve destekleyen kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Emine ERDEN'e ve öğrencilerine teşekkürlerimi arz ederim. Son olarak, zorunlu fizik tedavi sürecime ek olarak akademik çalışmalar yaptığım süreç boyunca şahsımı fiziken ve mental olarak destekleyen, her zaman yanımda olan ve gece gündüz demeden emek veren kıymetli aileme, saygıdeğer arkadaşlarıma ve özverili hastane arkadaşlarıma teşekkür eder şükranlarımı sunarım.

Yusuf BAYHAN
Gaziantep - 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
SİMGELER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
1.GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	10
2.1. Demontaj Hattı Dengeleme Problemlerine İlişkin Literatür Taraması	10
2.2. Araç Rotalama Problemlerine İlişkin Literatür Taraması	16
2.3. DHD Ve ARP'nin Birlikte İncelendiği Çalışmalara İlişkin Literatür Taraması	19
3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYONLAR.....	24
3.1. Model-1 Amaç Fonksiyonu Ve Matematiksel Formüller	28
3.2. Model-2 Amaç Fonksiyonu Ve Matematiksel Formüller	32
4. ARAŞTIRMA BULGULARI, SONUÇLAR VE TARTIŞMA	37
4.1. Veri Üretimi Ve Kıyaslama Örnekleri.....	37
4.2. Bulgular	40
4.3. Yönetimsel Analizler	42
4.3.1. α -Fizibilite Katsayısı Analizi.....	42
4.3.2. Çalışma Süresi Analizi	44
4.3.3. Maliyet Analizi	45
4.4. Sonuçlar, Tartışma Ve Öneriler	47
5. GERÇEK UYGULAMALAR VE ETKİLERİ	49
6. KAYNAKÇA	54
ÖZGEÇMİŞ	60

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1. Literatürdeki Örnek Çalışmaların Kıyaslanması	23
Çizelge 4.1. Yeniden Üretim Merkezleri İçin En Olası Talepler	39
Çizelge 4.2. Toplama Merkezleri İçin Arz Miktarları	39
Çizelge 4.3. Model-1 Çözüm Özeti	40
Çizelge 4.4. Model-1 Örnek Problem Amaç Fonksiyonu Sonuçları.....	40
Çizelge 4.5. Model-2 Örnek Problem Sonuçları.....	41
Çizelge 4.6. Açıklayıcı Örnek İçin Bileşenlerin Optimum Dağılımı.....	41
Çizelge 4.7. α -Fizibilite Katsayısı Analizi	43
Çizelge 4.8. Çalışma Süresi Analizi İçin Optimum Sonuçlar	44
Çizelge 4.9. Demontaj Maliyet Analizi İçin Optimum Sonuçlar	45
Çizelge 4.10. Kâr Analizi İçin Optimum Sonuçlar.....	46

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. BTA-B-TDDP Şeması	9
Şekil 3.1. Bütünleşik Toplama-Demontaj-Dağıtım Problemi Şeması.....	24
Şekil 4.1. Örnek – Oyuncak Araba Demontajı.....	37
Şekil 4.2. El Feneri Bileşenleri	38
Şekil 4.3. Dönüştürülmüş VE / VEYA Grafiği	38
Şekil 4.4. Model-1 Rotalama Diyagramı.....	40
Şekil 4.5. Belirtilen Örneğin Optimum Dağılımı	42
Şekil 4.6. Fizibilite Katsayıları Analizi Grafiği	43
Şekil 4.7. Çalışma Süresi Analizi İçin Optimum Sonuçlar Grafiği	44
Şekil 4.8. Demontaj Maliyet Analizi İçin Optimum Sonuçlar Grafiği.....	46
Şekil 4.9. Kâr Analizi İçin Optimum Sonuçlar Grafiği	46

SİMGELER

c, g	Yeniden üretim merkezi, $c, g = \{1, 2, \dots, N\}$
m, t	Toplama merkezi, $m, t = \{1, 2, \dots, E\}$
i	Görev
k	Bileşen
j, h	İş istasyonu
A	Yapay görev

Kümeler ve parametreler:

A_a	A 'nın yapay düğümleri
B_i	i 'nin normal düğümleri
$P(A_a)$	A_a 'nın öncül kümesi
$P(B_i)$	B_i 'nin öncül kümesi
$S(A_a)$	A_a yapay düğümünün hemen ardıl kümesi
$S(B_i)$	B_i yapay düğümünün hemen ardıl kümesi
d_{B_i}	B_i (s) 'nin görev süresi (normal düğüm)
J	İş istasyonu sayısı (üst sınır)
W_{time}	Çalışma süresi (s)
De_{gk}	k Bileşeni için g yeniden üretim merkezinin talebi
$\widetilde{De}_{gk}$	k Bileşeni için g yeniden üretim merkezinin bulanık talebi
Ct	Demontaj merkezinden yeniden üretim merkezine g veya toplama merkezine t Sabit nakliye maliyeti (cents-sent)
Sc	Bir ürünü demonte etmek için sabit maliyet (sent)
CI	Bir bileşeni stoklamak için sabit maliyet
μ	Büyük sayı (istasyona atanabilecek maksimum görev sayısı+1)
D_{cg}	Demontaj merkezi ile yeniden üretim merkezi arasındaki veya yeniden üretim merkezleri arasındaki mesafe (km)
Q	Demontaj hattında bir iş istasyonu açmak için sabit maliyet (\$/iş istasyonu)
Q_1	MÖS ürünleri toplayan aracın kapasitesi (birim)
Q_2	Bileşenleri dağıtan aracın kapasitesi (birim)

Pr	Talebi karşılayan kar
S_t	Toplama merkezi t arzı (birim)
DC_{mt}	Demontaj merkezi ile toplama arasındaki veya toplama merkezleri arasındaki mesafe (km)

Tamsayı Değişkenler:

U_g	Yeniden üretim merkezine uğradıktan sonra aracın yükü
UU_t	m toplama merkezine uğradıktan sonra aracın yükü
I_k	k bileşeninin envanter seviyesi
P	Demontaj hattındaki demonte ürünlerin sayısı
Cyc	Çevrim süresi (s)

İkili Değişkenler:

x_{ij}	B_i görevi j iş istasyonuna atanmışsa 1, aksi takdirde 0
y_{cg}	Araç demontaj merkezinden yeniden üretim merkezine veya yeniden üretim merkezleri arasında seyahat ediyorsa 1, aksi takdirde 0
yy_{mt}	Araç demontaj merkezinden toplama merkezine veya toplama merkezleri arasında seyahat ediyorsa 1, aksi takdirde 0
z_i	B_i görevi gerçekleştirilirse 1, aksi takdirde 0
F_j	j iş istasyonu açılırsa 1, aksi takdirde 0

KISALTMALAR

AEEE: Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya

ARP: Araç Rotalama Problemi

BTA-B-TDDP: Bulanık Talep Altında Bütünleşik Toplama-Demontaj-Dağıtım Problemi

DDHD-ARP: Dağıtılmış DHD ve ARP

DHD: Demontaj Hattı Dengeleme

DM: Demontaj Merkezi

E-Atık: Elektronik Atık

E-DHD-ARP: Entegre DHD ve ARP

E-DHD-ARP-MEÜ: Mobil Eklemeli Üretimle Entegre, DHD ve ARP

E-TDDP: Entegre Toplama-Demontaj-Dağıtım Problemi

KDTZ: Kapalı Döngü Tedarik Zinciri

KTDOP: Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama

KTDP: Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama

MÖS: Mamül Ömür Sonu

TTZ: Tersine Tedarik Zinciri

1.GİRİŞ

Hızlı kentleşme ve sanayileşmeyle birlikte teknolojik ürünlerin kullanım süreleri oldukça kısaltmaya başlamış olup gelişen teknolojiye paralel olarak elektronik atık miktarında da hızlı bir artış görülmektedir. Dünya nüfusunun artması, tüketim alışkanlıklarının çabuk değişmesi ve teknolojinin her geçen gün gelişiyor olması elektronik atık miktarını hızla arttırmakta olup atık yönetimini zorunlu hale getirmiştir. Dijitalleşen dünyada, iletişim ve bilgi teknolojileri kullanımı yoğun bir şekilde artmaktadır. Hızla artan elektronik atıklar, geri dönüşüm ve yeniden üretim konusunda hem ekolojik etkileri hem de finansal kârlılıkları nedeniyle son yıllarda daha fazla ilgi görmeye başlamıştır. Elektrikli ve elektronik ekipmanlardan kaynaklanan küresel atığın yıllık 20 ila 50 milyon ton arasında olduğu ve tahmini olarak yıllık %3 ila %5 artış oranı bulunduğu tahmin edilmektedir. Elektrikli/elektronik atıkların geri dönüştürülmesi çevre kirliliğini azaltabilir ve yeniden üretime sağladığı katkı ile yüksek kâr elde edilmesini sağlayabilir (Cucchiella vd., 2015; Dias vd., 2018). Bu durum tersine lojistik yönetimi için kritik hale gelmektedir ve sanayi sektöründeki şirketler arasındaki geri dönüşüm rekabeti gitgide artmaktadır (Diri Kenger vd., 2021b).

Teknolojik gelişmeler ve sanayileşme ile paralel olarak yaşanan hızlı kentleşme ve nüfus artışı hem ülkemizde hem de tüm dünyada insan faaliyetlerinin çevre üzerindeki baskısını hızla artırmaktadır. Üretim ve pazarlama faaliyetlerindeki genişlemeler, doğal kaynakların daha yoğun kullanımını kaçınılmaz kılarken, sürekli artan tüketim eğilimi ile birlikte oluşan elektronik atıklar da miktar ve zararlı içerikleri bakımından çevre ve insan sağlığını tehdit eder boyutlara ulaşmaktadır (Sunay, 2016). Kullanım ömrünü tamamlamış (MÖS-Mamül Ömür Sonu) elektronik ürünlerin toplanması ve kullanılabilir bileşenlerinin sistemli bir şekilde ayrıştırılması gerekmektedir. MÖS ürünün kendini oluşturan parçalara sistemli bir şekilde ayrıştırılması işlemine demontaj (söküm) denilmektedir. MÖS elektronik ürünlerden, demontaj yoluyla elde edilecek faydalı bileşenler, yeniden üretimde kullanılarak hem doğal kaynaklara olan talebi azaltacaktır hem de maliyet minimizasyonu desteği ile ekonomik katkı sağlayacaktır. Karar vericiler açısından bakıldığında, sistem maliyetini düşürme ortak hedefinin yanı sıra, müşteri memnuniyetini ve hizmet düzeyini artırmak tedarik zinciri yönetiminde her zaman önemli bir hedef olmuştur (Liu vd., 2021). Mevzuat ve çeşitli kamu politikaları nedeniyle

üreticiler üzerinde artan baskı, üreticileri elektronik atıkların etkilerini ciddi şekilde dikkate almaya yöneltmiştir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için birçok üretici tersine lojistiği iş kollarına dahil etmek durumunda kalmıştır (Kannan vd., 2017a). Atıkların geri dönüştürülmesi için kurulan tesislerde demontaj işlemi yapılarak işe yarar parçalar ayrıştırılabilmektedir. Elektronik atıkların geri dönüştürülmesi sürecinde demontaj hattı dengeleme (DHD) probleminin uygulanması etkin bir yoldur. Zaman faktörü de göz önüne alınarak çeşitli kriterlere göre ideal parça söküm sırası belirlenmektedir (Bedir vd., 2017).

Atık elektrikli ve elektronik eşya (AEEE) ile ilgili konular, sürdürülebilirlik çerçevesinde ekonomik, sosyal ve çevresel kaygılar nedeniyle son yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Aynı zamanda sosyal sorumluluk çerçevesinde kullanılmış ve/veya MÖS durumundaki elektronik ürünlerin yeniden üretim ve geri dönüşümü için yönetim süreçleri de dikkate alınması gereken önemli araştırma alanlarından. Elektrikli ve elektronik ürünler tersine lojistik süreçlerin yoğun yaşandığı faaliyetler olmakla birlikte en çok geri kazanımın da yaşandığı endüstri niteliği taşımaktadır. Elektronik atıklar içerisinde barındırdığı bileşen çeşitliliği ile (plastik, metal, cam, devre kartları, altın, bakır, alüminyum, işlemciler vb.) hem ekonomik değer ihtiva etmesi hem de yeniden kullanma kapsamında geniş bir yelpaze sunması sebebiyle önem arz etmektedir (Polat, 2020).

Hammaddenin sıralı işlemlerden geçerek değer kazanması, kullanıma hazır ürün haline dönüşmesi ve ürünün zamanında müşterilere ulaştırılması süreci tedarik zinciri olarak ifade edilmektedir. Kullanım neticesinde ömrünü tamamlayan veya hasar nedeniyle iade olan, müşteriden geri dönen ürünlerin toplanması, işlenmesi, yeniden üretime kazandırılması ve dağıtımı süreci ise tersine tedarik zinciri (TTZ)'ni ifade etmektedir ("Tersine Lojistik Ne Anlama Gelmektedir?", 2025). Tersine tedarik; ürün dönüşleri, yeniden imalat, yeniden kullanım, bertaraf, tamir gibi faaliyetleri içermektedir (Gülsün vd., 2008). TTZ, geleneksel tedarik zincirinin üreticiden tüketiciye akışının aksine, ürünlerin ve bilgilerin tüketim noktasından üretim veya elden çıkarılma noktasına kadar etkin ve verimli bir şekilde tekrar akışı olarak tanımlanmaktadır. TTZ'deki önemli faaliyetlerden biri olan demontaj ise ürünlerin yeniden kullanımını ve geri dönüşümünü sağlayan ilk aşamadır. DHD problemi ise, kullanılmış ürünlerin kısmen/tamamen demonte edilerek kullanılabilir bileşenler elde edildiği bir hat tasarımı belirlenmesini içerir (Stevenson vd., 2005). Amaç, öncelik gereksinimleri olan demontaj görevlerinin, tüm demontaj öncelik ilişkilerinin karşılanacağı şekilde sıralı bir iş istasyonları dizisine

atanmasıdır. Genel amaç ise, iş istasyonu sayısını ve çevrim süresini en aza indirmek ve kârı en üst düzeye çıkarmak gibi bazı performans ölçümlerini optimize etmektir. Çevik ve rekabetçi bir tersine tedarik ağına ulaşmak için, demontaj hattı ve tersine dağıtım süreçlerinin aynı anda çalışabilmesi gerekmektedir. Demontaj ve dağıtım süreçlerinin entegrasyonu; daha doğru, güvenilir ve kontrol edilebilir bir planlama sayesinde olacaktır (Özceylan vd., 2014).

Ekonomik açıdan bakıldığında, geri dönüştürülen ürünler daha ucuz bileşenler ve malzemeler sağlamaktadır ve bu da enerji, üretim ve nakliye maliyetlerinde tasarruf sağlar. Çevre açısından bakıldığında, malzemelerin ve bileşenlerin geri kazanılması, yeni (işlenmemiş) kaynaklara olan ihtiyacı azaltır ve çöp depolamayı önler. Paris antlaşması, AEEE (Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar) 'lerin en aza indirilmesi, iklim değişikliği ve çevre sorunlarıyla mücadelede en önemli kilometre taşlarından biri olmuştur. Sosyal açıdan bakıldığında ise, TTZ'nde yeni faaliyetler oluşturulmasının lojistik ve geri kazanım alanlarında yeni işler için bir kaynak olabileceğini de gösterilmiştir (Habibi, Battaia, vd., 2017a). MÖS durumundaki elektrikli ve elektronik ekipmanların toplama merkezlerinden başarılı bir şekilde toplanması ve sonrasındaki demonte işlemleri, TTZ'de sürdürülebilir operasyonlar açısından önemlidir. Demonte işlemi, müşterilerin yeniden üretim ve geri dönüşüm süreçlerine yönelik taleplerini karşılamak için MÖS bileşenleri ve alt montajları çıkarmayı amaçlamaktadır (İlgın, 2011). Müşteri bölgelerindeki kullanılmış ürünler, tatmin edici kalite özelliklerinin yetersizliği veya kusurlu olmaları nedeniyle de toplanmaktadır. Kullanılmış ürünler toplama merkezleri aracılığıyla toplanır ve demontaj merkez (DM)'lerine taşınır. Toplanan ürünlerin koşullarına göre, kullanılmış ürünler önemli bir işlem gerektirmiyorsa, doğrudan DM'lerine gönderilebilir, aksi takdirde toplanan ürünlerin geri kalanı imhaya gönderilir. Geri dönen ve yeniden üretim için uygun kalitede olan ürünler demonte edilir ve parça ve/veya bileşen haline gelene kadar işlenebilir. Kullanılmış ürünler demonte edildiğinde, bileşenler temizlenir ve test edilir. Demonte edilen parçaların incelenmesinden sonra, bir kısmı fabrikalara gönderilirken, geri kalanı imhaya gönderilir (Özceylan & Paksoy, 2014a).

Yeniden üretim ve demontaj uygulamaları yapan birçok ayrık parça üreticisi için TTZ ürünleri, hayati önem taşıyan lojistik bileşenler olarak ortaya çıkmaktadır (Easwaran & Üster, 2010). TTZ faaliyetleri işletmelerin yetkinliğini ve müşteri memnuniyet düzeyini geliştirebilir ve üretim maliyetlerini düşürebilir. Öte yandan TTZ, işletmelere bilinçli müşterilerin ilgisini çekebilecek çevresel bir imaj sağlar (Demirel & Gökçen,

2008). Daha temiz bir çevreye olan talebin artması nedeniyle çevreye duyarlı yeniden üretim ve geri dönüşüm önem kazanmıştır (Diri Kenger vd., 2020a). Apple, Panasonic, HP, GM, Kodak ve Xerox gibi birçok şirket, sürdürülebilir üretim sağlamak için operasyonlarını dönüştürmektedir (Deniz & Özçelik, 2019a). Apple, iPhone 6'yı hızlı bir şekilde parçalarına ayırabilen, Liam adında bir geri dönüşüm robotu geliştirmiştir. İki Liam robotunun her yıl 2,4 milyon telefonu parçalarına ayırabildiği belirtilmektedir (Rujanavech vd., 2016). Panasonic, Mart 2024 Mali Yılı PETEC geri dönüşüm oranı sonuçları yasal geri dönüşüm oranlarını aşarak yüksek bir geri dönüşüm oranına ulaşmıştır; çamaşır makinelerinde %93 (Yasal geri dönüşüm oranı %82), buzdolaplarında %81 (Yasal geri dönüşüm oranı %70), klimalarda %94 (Yasal geri dönüşüm oranı %80), plazma televizyonlarda %87 (Yasal geri dönüşüm oranı %74) oranında geri dönüşüm sağlandığı ve bunları yeni ürünlerde kullandığı belirtilmektedir (Recycling Processes, 2025). Panasonic Mart 2025 tarihli Petec geri dönüşüm oranı sonuçlarına göre ise toplamda 19.910.000 adet televizyon, çamaşır makinesi, buzdolabı ve klimanın geri dönüşümünü sağlayarak 366.513 ton çelik (446.967 araba ağırlığı eş değerinde), 58.078 ton bakır (232 Buda heykeli ağırlığı eş değerinde) ve 31 ton 629 alüminyum (275 uçak ağırlığı eş değerinde) geri dönüştürülerek yeniden üretime kazandırılmıştır (Panasonic Eko Teknoloji Merkezi (PETEC), 2025).

Yalnızca ileri zincirlerden oluşan geleneksel tedarik zincirleri, çevrenin korunmasıyla ilgili artan endişeleri gidermede yetersiz kalmış ve MÖS ürünlerin geri dönüşümüne yönelik faaliyetleri içermediklerinden hammadde kullanımının azaltılmasında etkili olamamıştır (Wang & Hsu, 2010). Yeniden kullanım, geri dönüşüm, yenileme veya parçalara ayırma gibi bir ürün geri kazanım stratejisinin benimsenmesi ve bu amaç için ilgili bir lojistik ağının tasarlanması TTZ ile mümkün olabilmektedir (Easwaran & Üster, 2010). TTZ'nde, sistem tarafından geri kazanılmayan malzemelerin yerine yeni malzemelere ihtiyaç duyulur. Son kullanıcılar ve müşteriler TTZ için girdi malzemelerinin kaynağıdır (Jayaraman vd., 1999). Çevre sorunlarına yanıt verilmesi, hükümet mevzuatına uyum sağlanması ve ekonomik fayda sağlanması nedeniyle tedarik zincirleri aracılığıyla geri dönüşüm faaliyetlerine artan bir ilgi vardır. TTZ optimizasyon problemi, bu amaca ulaşmak için etkili bir taktik olarak büyük bir potansiyele sahiptir (Özceylan & Paksoy, 2013a).

Günümüzde teknolojik cihazlar eskisinden çok daha hızlı bir şekilde atık akışına katılmaktadır (Güngör & Gupta, 2002a). Bu kısa yaşam döngüsü, üreticileri geri dönüşümün önemli bir parçası olan ürün geri kazanımını yani yeniden imalatı kullanmaya

zorlamaktadır. Yeniden imalatta, üreticiler demontaj işleminden sonra açığa çıkan bileşenleri kullanmaktadır. Bu nedenle yeniden üretim, geri dönüştürülmüş bileşenleri tekrar kullanarak üretim maliyetlerini ve çevre kirliliğini azaltır (Zhang vd., 2020). Bu noktada DHD problemi, yeniden üretim ve demontaj sürecinin maliyetini düşürmek için çok önemli bir aşamadır (Bentaha vd., 2015; Deniz & Özçelik, 2019a; Özceylan vd., 2019). Hat dengeleme problemlerinde, amaç fonksiyonu olarak çevrim süresini veya iş istasyonu sayısını en aza indirmek için görevler arasındaki öncelik ilişkisine dayalı olarak, görevler iş istasyonlarına atanır. Görevler genellikle her iş istasyonunda bir işçi tarafından gerçekleştirilir (Mete vd., 2016; Riggs vd., 2015).

Son yıllarda devletler ve müşteriler sürdürülebilir üretim ve tedarik zinciri yönetimine daha fazla önem vermeye başlamıştır. Tersine lojistik zinciri yönetiminin çevre dostu olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir (Kazemi vd., 2019). MÖS ürünlerin geri dönüştürülmesi ve yeniden üretime kazandırılması, kaynakların yeniden kullanımını, enerji tasarrufu ve hava kirleticilerinin azaltılmasını da sağlayabildiğinden, bu konu daha fazla vurgulanmaktadır (İlgın & Gupta, 2010a). MÖS ürünlerinin geri dönüşümü temel olarak çeşitli faaliyetleri içerir; malzemelerin toplanması, parçalara ayrılması, geri dönüştürülmesi ve depolanması ve atıkların bertaraf edilmesidir (Bentaha vd., 2014; İlgın & Gupta, 2010b). Bunlar arasında MÖS ürünlerinin toplanması ve parçalarına ayrılması esaslı ve önemlidir (Habibi, Battaia, vd., 2017). Mevcut çalışmalar genellikle ömrünü tamamlamış ürünlerinin toplanmasını ve sonrasındaki demonte faaliyetlerini ayrı ayrı ele almaktadır (Agrawal & Tiwari, 2008; McGovern & Gupta, 2007). Habibi vd. çalışmalarında, öncelikle toplama-demontaj problemini tanıtır, toplama ve demonte kararlarının bütünleşik optimizasyonunun hem ekonomik kazanç hem de müşteri memnuniyeti artışı sağlayabileceğini göstermiştir (Habibi, Battaia, vd., 2017a).

MÖS ürünleri üretime yeniden kazandıran birçok TTZ sistemi, demontaj işlemlerini gerektirmektedir (Altekin & Akkan, 2012). Bu nedenle demontaj, TTZ süreçlerindeki kilit aşamalardan biridir. DHD problemi ise geri dönüşümün başarısını etkileyen bir diğer önemli konudur (Deniz & Özçelik, 2019b). Ancak, etkili bir DHD tek başına başarılı bir tedarik zincirini garanti etmez. Demontaj süreçlerinin yanı sıra, bileşenlerin dağıtımı gibi diğer tersine lojistik süreçleri de tedarik zincirinin performansını ve kârlılığını etkilemektedir. Artan geri dönüşüm ve yeniden üretim süreçleri, tedarik zincirinde iade edilen ürünlerin büyük bir hareketine neden olarak tersine lojistik problemlerine yol açmıştır (Diabat, 2014; Kannan vd., 2017a). Bu noktada, MÖS ürünlerin toplanması ve sökülmesine ilişkin kararların optimize edilmesi

gerekmektedir; bu da araç rotalama probleminin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. (Habibi vd., 2017). Başarılı ve rekabetçi bir TTZ elde etmek için, birbiriyle yakından ilişkili iki süreç olan DHD ve tersine lojistik süreçlerinin birlikte etkin bir şekilde işletilmesi ve eş zamanlı olarak optimize edilmesi gerekmektedir (Özceylan & Paksoy, 2013a). Demontaj işleminden sonra geri dönüştürülen bileşenlerin talep merkezlerine verimli bir şekilde dağıtılması gerekmektedir. Bu nedenle lojistik planlama açısından, MÖS ürünlerin toplanması, demonte edilmesi ve dağıtılmasına ilişkin alınan kararların optimize edilmesi gerekmektedir (Habibi vd., 2017).

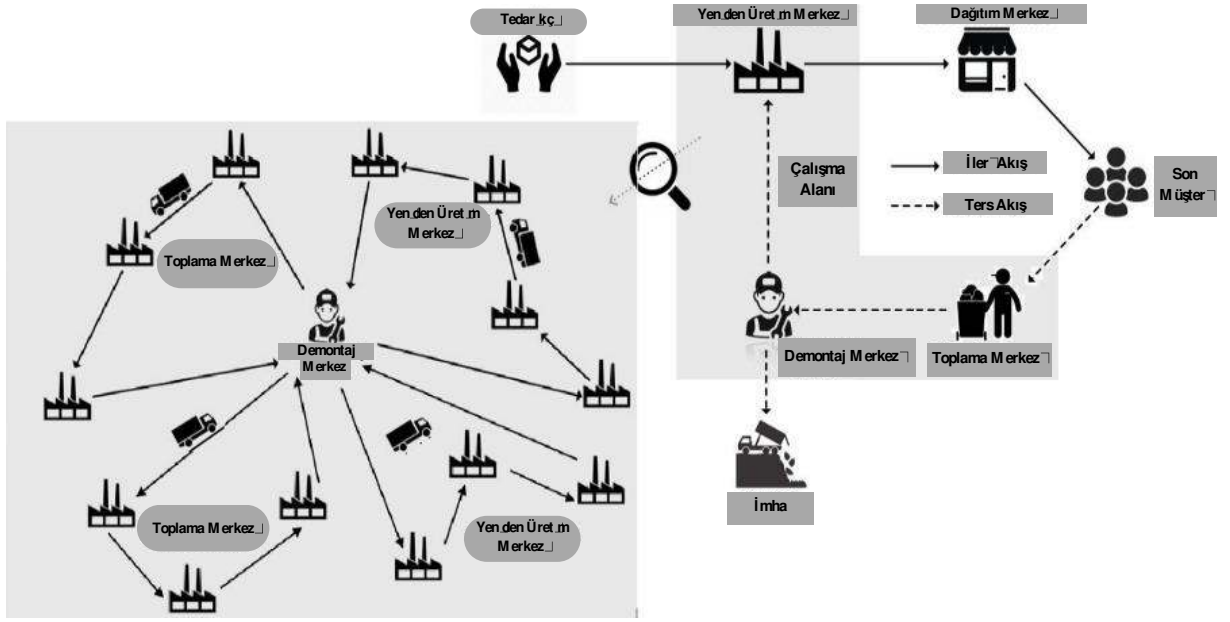
Geri dönüşüm pazarındaki MÖS ürünlere minimum maliyetle ulaşmak isteyen işletmeler, lojistik maliyetlerini olabildiğince azaltarak rakiplerine karşı avantajlı konuma geçmek ve pazara hâkim olmak istemektedirler. TTZ yönetiminde toplama ve dağıtım gibi lojistik faaliyetlerin etkili ve verimli bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Araç Rotalama Problemi (ARP), lojistik sektörde maliyetlerin azaltılması ve rotaların etkin bir şekilde planlanması amacıyla kullanılan en yaygın ve etkili yöntemlerden biridir. ARP, tedarik, taşıma ve malzeme ihtiyaçlarının arttığı 1950’li yıllarda Dantzig ve Ramser tarafından tanımlanarak modellenmiştir (Dantzig vd., 1959). Gezgin Satıcı Probleminin özel bir versiyonu olan ARP, faaliyet gösterilen pazarda talep noktalarına mal ve hizmet götüren araçların kat ettiği mesafelere uygun rotaların oluşturulmasını sağlamaktadır. Müşterilerin dağıtım ve/veya toplama taleplerini karşılamak amacı ile araç kapasitelerinin etkin kullanımı, rota uzunluğu, zaman aralığı gibi kısıtların sağlanarak toplam taşıma maliyetinin en küçüklenmesi (minimuma indirgenmesi) olarak tanımlanmaktadır. ARP’nin temel prensibi, müşteri talepleri karşılanırken depodan çıkan araçların kapasitesini aşmadan dağıtımını gerçekleştirerek başlangıç deposuna dönmesini en az maliyetle gerçekleştirmektir. Bununla beraber her aracın rotasında müşteriye sadece bir kez uğraması esastır. Bu sayede maliyetlerin azaltılması ve araç kapasitelerinin etkin kullanımı ile daha az araç kullanılması ve lojistik maliyetinin azaltılmasında büyük fayda sağlamaktadır (Dantzig & Ramser, 1959). Sonraki yıllarda ise değişen ihtiyaçlar doğrultusunda yeni ARP türleri ortaya çıkarak, bu problem türlerine çözüm üretmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Literatürde, Diri Kenger vd. entegre DHD ve ARP 'yi (E-DHD-ARP) tanıtmışlardır (Diri Kenger vd., 2020b). Yazarlar, MÖS ürünlerinin geri dönüşümü için bir DM ve geri dönüştürülmüş bileşenler talep eden birkaç yeniden üretim tesisi (müşteri) olduğunu varsaymışlardır. Yazarlar daha sonra, 3 Boyutlu (3B) yazıcılarla entegre DHD ve ARP’yi (E-DHD-ARP-3B) tanıtmışlardır (Diri Kenger vd., 2020a). Demontaj işlemi

sırasında işlemin karmaşıklığı veya işçilerin hataları nedeniyle bazı parçalar hasar görebilmektedir. Eklemeli üretim, hasarlı parçalar yerine yeni parçalar üretmek için kullanılır. Diri Kenger vd. daha sonra 3B yazıcıların olmadığı, entegre toplama-demontaj-dağıtım problemini (E-TDDP) tanıtmışlardır (Diri Kenger vd., 2021a). E-TDDP; önceki çalışmadan farklı olarak MÖS ürünlerin toplanması ve dağıtımını problemini de içermektedir. E-DHD-ARP, MÖS ürünlerin toplama merkezlerinden toplanmasını dikkate almazken, E-TDDP MÖS ürünlerin toplanmasını dikkate almaktadır (Diri Kenger vd., 2021a). Yazarlar daha sonra, mobil eklemeli üretimle entegre, DHD ve ARP'yi (E-DHD-ARP-MEÜ) tanıtmışlardır (Diri Kenger vd., 2021b). Bu çalışmada ise MÖS ürünler öncelikle tek bir demontaj merkezinde demonte edilmekte ardından 3B yazıcıyla donatılmış bir araçla hem geri dönüştürülmüş hem de 3B yazdırılmış bileşenler yeniden üretim merkezlerine gönderilmektedir. Talep edilen bileşenlerin bir kısmı demontaj merkezinden alınmakta, geri kalan kısmı ise yolda 3B yazıcıda üretilmektedir. Daha sonra Çil vd., DM'lerin birden fazla olduğu DHD ve ARP' nin tedarik zincirine entegre edilmesi (E-DDHD-ARP) modelini incelemişlerdir (Çil vd., 2023a). E-DDHD-ARP: Tamsayı programlama, kısıtlama programlama ve sezgisel algoritmaları ele almaktadır. E-DDHD-ARP, aynı anda iki ana sorundan oluşmaktadır: dağıtılmış DHD ve çok depolu ARP. Sistemde birden fazla DM mevcut olup, her DM'de MÖS bir ürünün demonte edilmesi için demontaj hattı kullanılmaktadır. Fabrikaların talebini karşılamak için DM'lerinde sökülen bileşenlerin yeniden üretim fabrikalarına dağıtılması gerekmektedir. Hangi depoların hangi yeniden üretim fabrikasının ihtiyacını karşılayacağı kararı, araçların güzergahını, nakliye maliyetini ve DM'lerindeki demontaj hatlarının çevrim süresini etkilemektedir. Bu nedenle, toplam iş istasyonu sayısını ve nakliye maliyetlerini en aza indirmek için dağıtılmış DHD ve ARP'nin aynı anda çözülmesi gerekmektedir (Çil vd., 2023a).

Toplama-demontaj problemi üzerine yapılan çalışmalar çoğunlukla deterministik (belirli) problemleri dikkate almaktadır (Diri Kenger vd., 2021a; Habibi, Battaia, vd., 2017a; Habibi, Battaia, vd., 2017). Ancak pratikte MÖS ürünlerindeki yeniden kullanılabilir bileşenlere yönelik talepler, değişken piyasa koşulları ve çevre politikaları nedeniyle belirsiz olabilmektedir (Ivanov vd., 2017; Özceylan & Paksoy, 2014a; Tuncel vd., 2014). Ayrıca belirsiz taleplerin olasılık dağılımlarını tam olarak elde etmek, geçmiş verilerin yetersiz olması nedeniyle genellikle zordur. Yapılan literatür incelemelerinde belirsiz bileşenlerden oluşan talepleri, ilk olarak Habibi vd., toplama-demontaj problemi üzerinde incelemişlerdir (Habibi vd., 2019). Belirsiz taleplerin olasılık dağılımının

bilindiğini varsaymaktadırlar. Ancak, elektronik ürünler gibi yüksek yenilenme ve değiştirme hızına sahip bazı ürünler için yeterli miktarda geçmiş veri bulunmayabilmektedir (Delage & Ye, 2010). Bu nedenle, belirsiz taleplerin tam olasılık dağılımı iyi tahmin edilemeyebilir. Olasılık dağılımındaki bu belirsizlikler matematiksel olarak bulanık mantık ile ifade edilmektedir. Bulanık mantık, belirsiz ve karmaşık durumlar karşısında net bir sonuç almak ve bu alanlarda karşılaşılan sorunlara daha makul cevaplar üretebilmek için kullanılan bir mantık yapısıdır. Klasik mantıkta önermelerin kesin doğru ya da kesin yanlış olduğu, matematiksel olarak “sıfır” ve “bir” gibi iki değere sahip olduğu bilinmektedir. Ancak, bulanık mantıkta durum kesin doğru ya da kesin yanlış olmaktan ziyade, sonsuz sayıda doğruluk değerlerini içeren ihtimal olduğunu ifade etmektedir. Buradaki tahmin durumu sayısal olarak sıfır ile bir arasında değerlere sahip olan bir fonksiyonu ifade eder. Bulanık mantık, belirsizlikle dolu problemleri ele almak için geliştirilen bir matematiksel modeldir (Yılmaz & Ergin, 2023). Ele aldığımız tez çalışmasında, bulanık talep altında bütünleşik toplama-demontaj-dağıtım problemi (BTA-B-TDDP) incelenmektedir. Probleme ilişkin görsel Şekil 1.1’de sunulmuştur. Şekil 1.1’de MÖS bileşenler ARP yoluyla DM’lere toplanmaktadır. DM’lerde yapılan demontaj işlemi sonrasında oluşan bileşenler yine ARP yoluyla talep merkezlerine (Yeniden üretim merkezlerine) dağıtılmaktadır. Demontaj işlemi sonrasında oluşan bileşenlere yönelik talepler, bulanık mantık altında incelenmiştir. Önerilen modelde yeniden üretim merkezleri birden fazla türde bileşen talep etmektedir. Problem tek bir demontaj merkezi, tek tip ürün ve çoklu bileşen ile ilgilidir. Taleplerdeki belirsizlik durumunu incelemek için iki model önermekteyiz. İlk modelde, demontaj işlemi neticesinde oluşan bileşenlerin tek bir tanesine talep olduğu varsayılmaktadır. İkinci modelde ise demontaj işlemi neticesinde oluşan tüm bileşenlere talep olduğu varsayılmaktadır. Modellere ilişkin detaylı bilgi ve matematiksel formüller üçüncü bölümde açıklanmaktadır.



Şekil 1.1. BTB-TDDP (Bulanık Talep Altında Bütünleşik Toplama-Demontaj-Dağıtım Problemi) Şeması

2. LİTERATÜR TARAMASI

Geri dönüşümün ekonomiye olan katkısı ve çevresel önemi ve demontaj işlemlerine endüstriyel robotların da dahil olmasıyla birlikte demontaj hatlarından elde edilen bileşenlerin sayısı ve kalitesi her geçen gün artmaktadır. Demontaj işlemi sonucunda ortaya çıkan bileşenler, firmalar tarafından hammadde olarak değerlendirilmekte ve ekonomiye büyük katkı sağlamaktadır (Elektronik Atık Geri Kazanım (AEEE), t.y.). Demontaj işlemi neticesinde oluşan bileşenlerin yeniden üretim merkezlerine dağıtılması, demontaj işlemi kadar önemli bir aşamadır. MÖS ürünlerin toplanmasında ve geri dönüştürülmüş bileşenlerin dağıtımında, ARP önemli bir rol oynamaktadır. Yaptığımız entegre çalışma üç önemli problem üzerinde durmaktadır: DHD, ARP ve bulanık mantık. Bu nedenle önce DHD ve ARP ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelenecek ve daha sonra bu iki problemin entegrasyonu ile ilgili çalışmalar incelenecektir.

2.1. Demontaj Hattı Dengeleme Problemlerine İlişkin Literatür Taraması

Geri dönüşümün öneminin artması aynı zamanda demontaj işleminin de öneminin artmasına neden olmuştur. Çünkü demontaj, geri dönüşüm sürecinin önemli bir adımıdır. Demontaj, atık elektronik ürünün geri dönüşümü sürecinde değerli bileşenlerin, bir dizi işlemlerle ürünlerden sistematik olarak ayrılması işlemidir. Demontaj verimliliğini artırmak amacıyla, ürünlerin otomatik olarak çıkarılması için demontaj hattı ideal bir seçimdir (Güngör & Gupta, 2002b). DHD problemini çözerken, görevler arasındaki öncelik ilişkileri ve çevrim süresi kısıtları dikkate alınmalıdır. Öncelik ilişkileri DHD problemini daha karmaşık hale getirir (Sontürk & Toksarı, 2023). DHD problemi, demontaj görevlerinin, görevler arasındaki tüm öncelik ilişkilerinin karşılanacağı ve bazı verimlilik ölçümlerinin optimize edileceği şekilde iş istasyonlarına atanması olarak ifade edilebilir (Ding vd., 2010).

DHD problemi hakkında ilk makale Güngör ve Gupta (2001) tarafından tanıtılmıştır. Ağ teorisine dayalı bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir (Güngör & Gupta, 2001). Güngör ve Gupta (2002), Basit Demontaj Hattı Dengeleme Problemini tanımlamış ve öncelik fonksiyonlu klasik montaj hattı dengeleme problemini değiştirmeye dayalı sezgisel bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir (Güngör & Gupta, 2002b). Bu öncü

makalelerden sonra, DHD probleminin yeni versiyonları tanımlanmış ve farklı çözüm metodolojileri uygulanmıştır. Öncelikle DHD problemi kısmi veya tam olarak sınıflandırılabilir. Kısmi versiyonda ürün tamamen demonte olmaz. Tekrar kullanılabilir durumda olan veya ihtiyaç duyulan parçalar sökülür. Özellikle kar odaklı DHD problemi, kısmi demontaja göre formüle edilir. Kar odaklı DHD probleminin amacı, gelir elde etmek için talebi karşılayabilecek parçalara karar verirken aynı zamanda karı maksimize etmektir. Görevler ve istasyon maliyetleri kapsamında seçilen parçaları demonte edecek görevler; açılacak istasyon sayısını, çevrim süresini ve demontaj hattının dengesini etkilemektedir (Altekin vd., 2008). Demontaj, operasyonel seviyede tahribatlı ve tahribatlı olmayan olarak sınıflandırılabilir (Koç vd., 2009). Diğer sınıflandırmalar ise belirsizliğe dayanmaktadır: deterministik ve stokastik/bulanık (Bentaha vd., 2015).

Demontaj Hattı Dengeleme Problemi ve Bulanık Demontaj Hattı Dengeleme, DHD problemini belirsizlik açısından ele alan problem tipleridir. Kalaycı ve Gupta tarafından önerilen sıra bağımlı DHD problemi, DHD probleminin bir genellemesidir (Kalaycı & Gupta, 2014). Görev-zaman etkileşimleri, DHD problemi ve sıra bağımlı DHD problemi arasındaki farktır. Önceliksiz görevler etkileşime girdiğinde, görev zamanları gerçekleştirildikleri sıraya göre etkilenebilir (Kalaycı & Gupta, 2013). Hezer ve Kara araştırmacılara, her zamanki düz montaj hatlarının yanı sıra yeni bir hat türünün incelendiği paralel DHD problemini önermişlerdir (Hezer & Kara, 2015). Paralel demontaj hatları, paralel olarak yerleştirilmiş iki veya daha fazla düz demontaj hattından oluşur. Çok Amaçlı Demontaj Hattı Dengeleme, problemin çok amaçlı doğasını vurgular. Stokastik (belirsiz) Karma Model U Tipi Demontaj Hattı Dengeleme, Stokastik Kar Odaklı DHD problemi, Çok Amaçlı Sıra Bağımlı Demontaj Hattı Dengeleme, Çok Amaçlı Stokastik Demontaj Hattı Dengeleme ve Çok Amaçlı Bulanık Demontaj Hattı Dengeleme, DHD probleminin diğer iç içe geçmiş versiyonlarıdır (Deniz & Özçelik, 2019a). Parametrelerin yapısı dikkate alındığında bir DHD problemindeki belirsizliğe; görev süreleri, talep, çevrim süreleri ve amaç fonksiyonları ile demontaj işlemlerinde meydana gelebilecek diğer öngörülemeyen olaylar da dahil olabilmektedir. Bu nedenle, parametrelerin belirsiz doğasını dikkate almak ve uygun deterministik olmayan modeller geliştirmek, DHD'nin pratik etkilerini artırmak için gerekliliklerdir. DHD modellerinde belirsizliği ele almak için stokastik ve bulanık yaklaşımlar kullanılmaktadır (Özceylan vd., 2019).

Demontaj hattı dengeleme problemlerine odaklanan az sayıda derleme çalışması bulunmaktadır. Literatür incelendiğinde öne çıkan beş derleme makalesi yakından incelenmiştir:

Özceylan vd. (2019), DHD problemleri üzerine detaylı bir literatür tarama çalışması gerçekleştirmiştir. MÖS ürünlerin geri dönüştürülmesinde önemli olan dokuz farklı kriter (hat tipleri, hedefler, ürün tipleri, parametre yapısı, demontaj seviyeleri, demontaj süreci, komplikasyonlar, model ve çözüm yaklaşımları, sökülen ürün) üzerinden sınıflandırma yapmıştır. Hat tipleri göz önünde bulundurulduğunda demontaj hatları; düz, U tipi, paralel ve iki taraflı demontaj hatları olarak sınıflandırılabilir. Düz demontaj hattında, ürünler tanımlanmış bir çevrim süresi kısıtlaması altında çalışan sıralı bir iş istasyonu dizisi içinde demontaj edilir (Hezer & Kara, 2015). Bazı durumlarda, geri dönüştürülmüş parçalara olan yüksek talep nedeniyle düz bir demontaj hattının kapasitesi yetersiz kalır. Bu nedenle, talebi karşılamak için kapasiteyi artırmak istenir. Bunu yapmanın yollarından biri paralel demontaj hatları tasarlamaktır (Ketzenberg vd., 2003). U tipi demontaj hatları kullanılarak operatörlerin gereksiz hareketlerinde azalma ve işgücü planlamasında daha yüksek esneklik elde edilebilir. U tipi demontaj hatlarında ürün akışı ve dolayısıyla operatör hareketi saat yönünde veya saat yönünün tersine olabilir (Agrawal & Tiwari, 2008). Kapasite sorununun üstesinden gelmek için, demontaj hatları, ürünlerin bir üretim hattı boyunca aktığı ve hattın her iki tarafında iş istasyonları bulunan iki taraflı olarak da yerleştirilebilir (Bartholdi, 1993). İncelenen çalışmaların büyük çoğunluğu, demontaj istasyonlarını düz bir hat üzerinde dengelemeyi hedeflemekte olup, temel amaçları toplam iş istasyonu sayısını ve istasyonların boşa kalma sürelerini en aza indirmektir. Tehlikeli parçaların erken çıkarılması ise daha az öncelikli bir hedef olarak görülmektedir. Tek ürün tipi en yaygın olarak tercih edilen ürün türü olmakla birlikte, deterministik modeller stokastik ve bulanık parametreleri kullanan çalışmalara kıyasla daha baskındır, görev işleme süresi ise en sık karşılaşılan belirsiz faktördür. Demontaj seviyeleri arasında tam demontaj yaygın olup, tahribatsız demontaj işlemleri öne çıkmaktadır. Tehlikeli iş parçalarının dikkate alınması en popüler komplikasyonken, yüksek talep gören parçaların çıkarılmasına öncelik verilmesi daha az ele alınmıştır. Modelleme yaklaşımlarında sezgisel ve meta-sezgisel yaklaşımlar baskın olup, çözüm için doğrusal ve stokastik programlama kullanımı yaygındır. Çalışmaların çoğu sayısal örneklerden ziyade vaka çalışmalarıyla doğrulanmaktadır. En sık demonte edilen ürünler ise kişisel bilgisayarlar ve cep telefonlarıdır (Özceylan vd., 2019).

Deniz ve Özçelik (2019b), DHD literatürüne bibliyometrik ve sosyal ağ analizi uygulamıştır. DHD problemi literatürüne farklı bir yaklaşım sunarak, bibliyometrik ve sosyal ağ analizini geleneksel sistematik literatür taramasıyla birleştiren ilk çalışma olma özelliğini taşımaktadır. Ayrıca, literatürdeki boşlukları belirlemek maksadıyla “Gelecekteki Çalışma Gerçekleştirme Analizi” adlı yeni bir araç önerilmiştir. Geleneksel tasarım yaklaşımlarından "demontaj için tasarım" anlayışına geçişle birlikte, demontaj hatları ve bunların etkin dengelemesi giderek daha fazla önem kazanmıştır. DHD problemi, montaj hattı dengeleme problemine kıyasla nispeten yeni bir araştırma alanıdır. DHD problemini çözmek için iki ana eğilim tespit edilmiştir; kesin çözüm metodolojileri ve metasezgisel yaklaşımlar. Kesin çözüm metodolojileri olarak çok amaçlı programlama, tam sayı/karma tam sayı programlama ve hedef programlama gibi yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Doğrusal fiziksel programlama ise bu bağlamda önerilen en yeni tekniktir. Problemin herhangi bir algoritmayla optimal sonucuna ulaşamayan zor yapısı nedeniyle genetik algoritma ve karınca kolonisi optimizasyonu en yaygın kullanılan metasezgisel yöntemlerdir. Hibrit metasezgisel yöntemlerin kullanımı bu alanda başlamıştır. Değişkenlik ve belirsizlik, DHD problemlerindeki en büyük sorun olarak tanımlanmasına rağmen, değişkenlik (stokastik ve bulanık programlama gibi yaklaşımlarla) sınırlı sayıda makalede ele alındığı görülmüştür. Montaj ve demontaj entegrasyonu, paralel, U tipi ve iki taraflı hatlar gibi farklı hat konfigürasyonlarının incelenmesi hala önemli boşluklardır. DHD problemi çok amaçlı bir problem olmasına rağmen, literatürde sınırlı sayıda skalerizasyon tekniği kullanılmıştır. AHP, TOPSIS, bulanık AHP ve PROMETHEE gibi çok kriterli karar verme tekniklerinin daha fazla uygulanması gerekmektedir. Hız, esneklik ve çevresel konular gibi yeni kriterlerin de dahil edilmesi önemlidir. Bazı metasezgisel yöntemlerde (örn. VNS) iyileştirme ihtiyacının yanı sıra, yapay bağışıklık sistemi, bakteriyel arama ve Endosimbionik Evrim Algoritması gibi yeni metasezgilerin DHD problemine uygulanması önerilmektedir. Karmaşık VE/VEYA öncelik grafiklerinin analizi, yapay sinir ağları, çoklu ajan sistemleri ve işbirlikçi planlama yapıları gibi teknikler DHD problemlerinde kullanılabilir. Rotalama, kamyon yükleme ve planlama gibi sorunların DHD problemi ile birleştirilmesi de önerilmektedir (Deniz & Özçelik, 2019b).

Laili vd., (2020) derleme çalışmalarında, farklı DHD problemi modelleri arasında birçok ortak noktayı ortaya koymuş ve mevcut değişkenleri, hedefleri ve kısıtlamaları tekdüze bir gösterimle listelemiştir. Birkaç belirsiz konu ile ilgili olarak model karşılaştırması sağlanmıştır. Daha sonra, modelin farklı ortamlara genişletilebilirliği

gösterilmiştir. DHD problemini kapsamlı bir görünümde çözmek için yaygın olarak kullanılan çok amaçlı evrimsel algoritmaları uygulamak üzere bir kodlama yolu oluşturulmuştur. Bazı temel sonuçlar, böylesine karmaşık bir problemi çözmek için tipik algoritmalar tarafından elde edilen çözümleri göstermiş ve mühendislere algoritma seçimi ve DHD problemi üzerinde uygulama için bir ipucu vermiştir. Bu makalede önerilen formüllerin, model eşleme ilişkisi ve algoritma karşılaştırması, demontaj hattı dengelemesinin pratik uygulaması için mühendislik referansı olarak görülebileceği önerilmiştir. Bu makalenin gelecekteki başlıca çalışmalarından biri, birleşik DHD problemi modelini farklı pratik ortamlara genişletmek ve önemli DHD problemi özelliklerinin sistematik bir alt kümesini ele almak için bir çözüm prosedürü geliştirmektir. Ayrıca, büyük ölçekli demontajda geçmiş ve gelecekteki gelişmeler için ortak bir referans oluşturmak amacıyla birleşik gösterimlerin kullanılması (ve gerekirse genişletilmesi) teşvik edilmektedir (Laili vd., 2020).

Güler vd. (2024), derleme çalışmalarında kısmi DHD problemi üzerine kapsamlı bir literatür taraması sunmaktadır. Problemin analizi sekiz temel kategoriye göre yürütülmüştür: problem özellikleri (hat düzeni türü, ürün türü, demontaj koşulları ve etkileyen faktörler), demontaj süreci (yıkıcı ve yıkıcı olmayan), demontaj seviyesi veya derinliği, hedefler, kısıtlamalar, çözüm yaklaşımları (sezgisel yöntemler, matematiksel programlama), otomasyon seviyesi (manuel, insan-robot iş birliği, robotik) ve demontaj ürünleri. Kısmi DHD alanındaki mevcut çalışmalar ağırlıklı olarak; düz hat düzenlerini ve tek ürün tiplerini ele almaktadır. Deterministik demontaj ortamlarını tercih etmekle birlikte, stokastik ortamlarda en sık incelenen belirsizlik faktörü "görev işlem sürelerindeki değişkenliktir". Probleme çözüm bulmak için en yaygın olarak yinelemeli sezgisel yöntemler ve özellikle de genetik algoritma kullanılmaktadır. Matematiksel programlama da bir seçenek olmakla birlikte, kullanımı sezgiseller kadar etkin değildir. Uygulama bazında modellerin doğrulanmasında genellikle manuel hatlar ve "vaka çalışması" verileri (örneğin, tükenmez kalem, radyo) tercih edilmektedir. Alanda birçok konuda araştırma boşlukları vardır. U-tipi, paralel gibi alternatif hat düzenleri ve karışık/çok modelli ürün tipleri yeterince incelenmemiştir. Yıkıcı demontaj süreçleri ve özellikle çevresel ve sosyal (örneğin, ergonomi, karbon ayak izi, iş güvenliği) hedefleri içeren çalışmaların sayısı oldukça azdır. Ürün tipleri göz önünde bulundurulduğunda demonte edilmiş ürünler; tek, karışık ve çok ürün olmak üzere üç türe ayrılabilir. DHD probleminin doğal karmaşıklığı nedeniyle, çalışmaların büyük çoğunluğu (%96 civarı) tek ürün durumunu ele alır. Karışık ürün türüyle ilgilenen üç çalışma vardır: (Agrawal &

Tiwari, 2008; Paksoy vd., 2013; Riggs vd., 2015); ve ayrıca üç çalışma da demontaj için çoklu ürün modelleriyle ilgilenmiştir: (İlgın vd., 2017; İlgın & Gupta, 2010a; Kannan vd., 2017a). Birçok sezgisel ve matematiksel programlama tekniği kısmi DHD problemi alanında henüz keşfedilmemiştir. Farklı optimizasyon problemlerini (örneğin, araç rotalama, planlama) kısmi DHD problemi ile entegre eden hibrit çalışmalar yetersizdir. Otomasyon ve Teknoloji açısından alan, manuel hatlara odaklanmış durumdadır. Robotik demontaj (tam otomasyon) ve insan-robot iş birliği (kobotizasyon) gibi modern otomasyon teknolojileri ciddi bir araştırma boşluğu teşkil etmektedir. Çalışmaların büyük bir kısmının "vaka çalışması" verilerine dayanması, gerçek endüstriyel verilerin ve uygulamaların kullanımında önemli bir eksiklik olduğunu göstermektedir (Güler vd., 2024).

He vd. (2024) inceleme çalışmalarında, DHD sorunları üzerine yayınlanmış araştırma makalelerinin kapsamlı bir incelemesini sunmuştur. Bu önemli konu için yeni bir üçlü notasyon standardizasyonu önermiş ve 2010'dan 2024 Haziran ayına kadar 150'den fazla bilimsel dergi ve konferans yayını sorun ortamları, koşullar ve çözüm yöntemleri perspektiflerinden incelemiştir. Çok ürünlü DHD problemi, kaynaklarla DHD problemi ve DHD tabanlı entegre sorunlarla ilgili ortaya çıkan üç sorun ortamını belirleyerek başlamış daha sonra, çok amaçlı DHD problemi, belirsizlik altında DHD problemi ve özellikle belirsizlik altında çok amaçlı DHD problemi dahil olmak üzere koşulları incelemiştir. Daha sonra, deterministik ve deterministik olmayan amaçlar için ilgili çözüm yöntemlerini özetlemiş ve sınıflandırmıştır. Mevcut literatürün bir kısmı çok ürünlü DHD problemini ele almıştır. Ancak, ilgili çalışmalar nadiren yüksek teknoloji makineler, akıllı robotlar veya çok becerikli işçiler gibi çok ürünlü durumlar için özel kaynakları dikkate alır. Belirli kaynaklara sahip çok ürünlü DHD problemi için gelecekteki araştırma yönleri şunları içerebilir: (1) insan becerisi, yeteneği, yeterliliği, yorgunluğu ve öğrenme etkileri gibi insan faktörlerinin etkilerini derinlemesine araştırmak; (2) çalışma koşullarını ve çalışan memnuniyetini değerlendirmek; (3) çok ürünlü DHD probleminde insan-makine koordinasyonunu ve iş birliğini araştırmak; (4) ilgili problemler için verimli modeller ve yöntemler geliştirmek. Özetle, DHD araştırmalarının geleceği; çoklu ürün, insan faktörleri, esneklik (yeniden yapılandırılabilirlik) ve sürdürülebilirlik (enerji maliyeti) gibi daha dinamik ve entegre sorunları ele alan modellerin geliştirilmesine bağlıdır. Bu alanlar, hem akademik literatüre önemli katkılar sunma hem de demontaj endüstrisinin pratik ihtiyaçlarına yenilikçi çözümler getirme potansiyeli taşımaktadır (He vd., 2024).

DHD probleminin amacı, talebi karşılayarak demontaj hattının kaynaklarını mümkün olduğunca verimli bir şekilde kullanmaktır. Kaynakların verimli kullanımı, gereken en az sayıda demontaj istasyonunun bulunması, demontaj görevlerinin iş istasyonlarına en uygun şekilde atanması ve demontaj hattının düzeni ve malzeme taşıma özelliklerinin iyileştirilmesinden oluşur (Gungor vd., 2001). Bu bölümde bazı sınıflandırma kriterlerine (Hat tipleri, Performans ölçümlerinin analizi, Ürün tipleri, Parametrelerin yapısı) göre seçilen makalelerle DHD ile ilgili detaylı literatür analizi yapılmıştır.

2.2. Araç Rotalama Problemlerine İlişkin Literatür Taraması

ARP, lojistik alanında bir dizi aracın optimum veya optimuma yakın rotalarının bulunmasına yönelik oldukça sıklıkla çalışılan problemlerdendir. Literatürde çeşitli amaç (mesafe, araç sayısı, süre, yakıt tüketimi minimizasyonu vb.) ve kısıtları dikkate alan birçok ARP türevine ve çözüm yöntemine rastlamak mümkündür. Rotalama çalışmalarında genellikle temel amaç mesafeyi veya süreyi minimize etmektir (Li vd., 2018; Rao vd., 2016; Soysal vd., 2018). Ancak, kaynakların sınırlı olması, çevresel kirliliğin önüne geçme gerekliliği vb. nedenler işletmeler için birer itici güç olmuş, insanların lojistiğe bakış açıları değişmiş, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonunun en aza indirilmesi zamanla zorunluluk haline gelmiştir. Böylece yakıt tüketimini azaltmak, zaman ve enerjiden tasarruf sağlamak için ARP'in etkin bir şekilde çözülmesi gerekmektedir (Kısa Toğrul, 2024).

Bir tedarik zincirini iyi yönetmek şüphesiz ki en önemli unsuru olan lojistik ağını iyi yönetmekten geçmektedir. Literatürde ilk olarak Dantzig ve Ramser tarafından ortaya atılan klasik ARP'de amaç, homojen bir araç filosu için bir dizi müşteriye hizmet vererek, her araç rotasının aynı noktada başlayıp biteceği şekilde en uygun rota planını belirlemektir (Dantzig & Ramser, 1959). ARP ve varyantları son 60 yılda yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Farklı ARP modelleri hakkında daha detaylı bilgi için Toth ve Vigo'nun kitabı, Koç ve Laporte'nin araştırmaları ve Vidal vd. çalışmaları incelenebilir (Koç & Laporte, 2018; Toth & Vigo, 2014; Vidal vd., 2020).

Literatürde metasezgisel ve kesin yöntemle çözülen çalışmalara ilave olarak sezgisel algoritmalar ile çözülen çalışmalar da mevcuttur (Karadurmuş ve Erdoğan, 2019; Bakeshloo ve diğ., 2016; Bruglieri ve diğ., 2016); Mirmohammadi ve diğ., 2017; Poonthalir ve Nadarajan, 2019; Çimen ve Soysal, 2017; Macrina ve Guerriero, 2018; Zhou ve Lee, 2017; Macrina ve diğ., 2019b; Rezaei ve diğ., 2019; Ene ve diğ., 2016; Abdoli ve diğ., 2019; Soysal ve Çimen, 2017; Wang ve diğ., 2019b; Masghati-Amoli ve Haghani, 2020).

Fisher (1995), ARP modeli için geliştirilen en önemli algoritmaları sunar. Birçok şirket, kamyonculuk operasyonlarını optimize etmek için matematiksel algoritmaların başarılı bir şekilde uygulanması gerektiğini önemsemektedir. Coğrafi bilgi sağlamak için iki yaklaşım benimsenmiştir. İlk yaklaşımın uygulanması kolaydır ve bu nedenle yeterince doğruysa tercih edilir. Her müşteriye koordinatlar atamak ve müşteriler arasındaki seyahat mesafesinin koordinat çiftleri arasındaki Öklid mesafesi olduğunu varsaymaktan oluşur. Maliyetin mesafeye orantılı olduğu kabul edilir. Mesafe genellikle müşteriler arasında düz bir çizgiden sapan yolları dengelemek için bir faktörle ölçeklendirilir. İkinci yaklaşım, yol sisteminin bilgisayarlı bir ağ modeline en kısa rota algoritmasını uygulayarak seyahat mesafelerini elde eder (Fisher, 1995).

Toth ve Vigo (2002) çalışmalarında, dağıtım sistemlerinde Operasyon Araştırması (Yöneylem Araştırması) ve Matematiksel Programlama tabanlı optimizasyon tekniklerinin artan önemini ve başarısını ele almışlardır. Dağıtım planlamasında bilgisayar tabanlı optimizasyon yöntemlerinin kullanılması, küresel taşıma maliyetlerinde %5 ila %20 arasında önemli bir tasarruf sağlamaktadır. Taşıma giderleri, bir ürünün nihai maliyetinin yaklaşık %10 ila %20'sini oluşturduğundan, bu tasarrufların genel ekonomik sistem üzerinde büyük bir etkisi vardır. Bu tekniklerin yaygınlaşmasının ve başarısının arkasında üç temel neden yatmaktadır: Bilgisayar donanım ve yazılımlarındaki teknolojik ilerlemeler, bilgi sistemlerinin üretim ve ticari süreçlere giderek daha fazla entegre edilmesi ve gerçek dünya problemlerinin karmaşıklığını doğru bir şekilde yansıtabilen gelişmiş modelleme teknikleri ve bu modeller için makul hesaplama sürelerinde etkin çözümler üretebilen gelişmiş algoritmalar. Çalışma, spesifik olarak depolar ve nihai müşteriler arasındaki mal dağıtım problemlerine yani ARP'ye odaklanmaktadır (Toth & Vigo, 2002).

Eksioglu vd. (2009) çalışmasında; farklı dönemler, dergiler, analiz yolları ve araştırma stratejilerini temsil eden ARP makalelerini, öznel bir seçim süreciyle incelemiştir. Çeşitli ülkelerden yazarların katkıda bulunduğu 1021 ARP makalesini

sınıflandırmak için kapsamlı bir taksonomi geliştirilmiştir. Bu taksonomide, 686 tam makale ve 314 özetin incelenmesiyle bazı sonuçlar çıkarılmıştır. ARP'nin tanımı ve ele alınışında fikir birliği yoktur. Çözüm yöntemlerinin performansını iyileştirme stratejileri eksiktir. ARP genellikle statik incelenmiş, dinamik yaklaşımlar ise 1986'dan itibaren ortaya çıkmıştır. ARP literatürüne epistemolojik bir çalışma yapılmamıştır ve makalelerin yıl, dergi ve çözüm yöntemlerine göre dağılımı raporlanmamıştır. En çok atıf alan veya etkili yazar, makale ve dergiler üzerine çalışma yoktur (Eksioglu vd., 2009).

Campbell ve Wilson (2014) çalışmalarında periyodik araç planlama probleminin geniş uygulanabilirliğini ve çok yönlülüğünü incelemektedir. Bu çalışma hem yeni uygulamaları hem de çözüm yöntemlerini ele alan geniş bir literatüre yol açmıştır. Periyodik araç rotalama problemi ilk olarak 1974 yılında çöp toplama ile ilgili bir makalede ortaya çıkmıştır (Beltrami & Bodin, 1974). Yazarlar, ARP'nin uygulandığı çok çeşitli koşulları ve ortamları ele almakta ve periyodik ARP için hem kesin hem de sezgisel çözüm yöntemlerinin geliştirilmesini açıklamaktadır. Birçok temel araştırma probleminde olduğu gibi, birçok varyant önerilmiştir. Çözüm yöntemlerinin gelişimi, artan hesaplama gücü ve standart test veri setlerinin ortaya çıkmasıyla doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür. Periyodik ARP çözüm yöntemleri, basit yapıcı sezgisellerden başlayarak, zamanla matematiksel programlama ve meta-sezgisellerin entegre edildiği çok karmaşık yaklaşımlara evrilmiştir. Bu evrim, hem uygulamadaki gerçek ihtiyaçlar tarafından tetiklenmiş hem de araştırmacıların kendi yöntemlerini objektif bir şekilde karşılaştırabilmelerini sağlayan standart test problemlerinin geliştirilmesiyle hızlanmıştır (Campbell & Wilson, 2014).

Elshaer ve Awad (2020) çalışmalarında, 2009 ile 2015 arasında yayınlanan ARP literatürünün taksonomik bir incelemesini sunmaktadır. İncelenen makalelerin çoğunda problemi ve varyantlarını çözmek için metasezgilerin kullandığı belirtilmiştir. Makale, iki yönlü amaca hizmet etmektedir: birincisi, metasezgisel algoritmalar kullanılarak çözülen ARP'yi ve varyantlarını sınıflandırmak; ikincisi, ARP problemlerini çözmede her bir metasezgisel algoritmanın katkısını araştırmak. İncelenen 299 makalede, metasezgisel algoritmaların toplam 386 kullanım durumu tespit edilmiştir. Kullanılan metasezgisellerin %63,7'si tek çözüm tabanlı, %36,3'ü ise popülasyon tabanlı algoritmalar olduğu görülmüştür (Elshaer & Awad, 2020).

Konstantakopoulos (2022), derleme çalışmasında, lojistik dağıtımda ARP üzerine yapılmış kapsamlı bir literatür taramasını sunmaktadır. 2010 ve 2020'nin ilk çeyreği arasında Scopus veritabanından alınan 334 makale incelenmiş ve eleme kriterleri sonrası

263 makale analize dahil edilmiştir. Çalışmanın ana odağı, özellikle yük taşımacılığı vakalarında ARP'nin farklı varyantları için önerilen ve geliştirilen çözüm algoritmalarıdır. Yerel arama metasezgileri, araştırmacılar arasında popülerliğini korumaktadır. Bunun en önemli nedenlerinden biri, diğer algoritmalarla kolayca birleştirilebilmeleri ve etkili çözümler sunabilmeleridir. Hibrit algoritmalar, farklı algoritmaların avantajlarını bir araya getirmesi sayesinde, ARP'nin birçok varyantında kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Çevre düzenlemelerinin artmasıyla birlikte, Yeşil ARP, Hibrit ve Elektrikli Araçlar için ARP gibi konuların önümüzdeki yıllarda daha fazla ilgi çekeceği öngörülmektedir. Müşteri taleplerinin arttığı rekabetçi ortamda, dağıtım sürecini bütünsel olarak optimize etme ihtiyacı, çok katmanlı ve çok aşamalı ARP üzerine yapılan araştırmaları artıracaktır. Lojistik firmaları arasında maliyetleri düşürmek ve teslimatları optimize etmek amacıyla yapılacak işbirliklerini temel alan bu konunun gelecekte daha fazla önem kazanması beklenmektedir (Konstantakopoulos vd., 2022).

2.3. DHD Ve ARP'nin Birlikte İncelendiği Çalışmalara İlişkin Literatür Taraması

Bu bölüm, entegre DHD ve dağıtım problemleri ile ilgili çalışmalara genel bir bakış sunmaktadır. Bölüm iki kısma ayrılmıştır. İlk kısımda, ARP'yi dikkate almaksızın DHD problemini tedarik zincirine entegre eden çalışmalar açıklanmaktadır. İkinci kısımda ise DHD ve ARP'yi bütünleşik bir şekilde ele alan çalışmalar açıklanmıştır.

ARP'yi dikkate almaksızın DHD ve TTZ entegrasyonuna yönelik ilk çalışma Özceylan ve Paksoy (2013a) tarafından yapılmıştır. Özceylan ve Paksoy, DHD ve TTZ entegrasyonu üzerine bir matematiksel model önermişlerdir. Çalışmalarında, DHD problemi ile tersine tedarik zincirinin optimizasyonu ele alınmış ve ele alınan problem için doğrusal olmayan bir matematiksel formülasyon sunulmuştur (Özceylan & Paksoy, 2013a).

DHD ve ARP'nin entegrasyonu ile ilgili olarak, Habibi vd. MÖS ürünlerin toplanması için entegre bir tedarik-demontaj problemi sunmuştur (Habibi vd., 2014). Ancak, çalışmada geri dönüştürülmüş bileşenlerin dağıtımını dikkate alınmamıştır. Ayrıca Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama (KTDOP) modellerini eşdeğer Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP) modeli olarak yeniden formüle etmek için iki doğrusallaştırma yöntemi sunmuşlardır.

Özceylan vd. (2014) satın alma, nakliye, yenileme ve demontaj iş istasyonu işletme maliyetlerini içeren toplam maliyeti en aza indirmek için DHD problemi ile kapalı döngü tedarik zincirinin optimizasyonunu ele almaktadır (Özceylan vd., 2014). Özceylan ve Paksoy (2014) tersine tedarik zincirini belirsizlik altında DHD problemi ile optimize etmiş ve problem için iki bulanık matematiksel programlama yaklaşımı önermiştir (Özceylan & Paksoy, 2014). Kannan vd. (2017a) DHD ve tersine lojistiği entegre etmiş ve problem için matematiksel bir formülasyon sunmuştur (Kannan vd., 2017a). Ancak, tüm bu çalışmalar demonte parçaların yeniden üretim merkezlerine dağıtımını bir ARP kapsamında ele almamıştır.

Literatürde, DHD ve ARP ile ilgili ayrı ayrı çalışmalar bulunmaktadır fakat ikisinin entegre incelendiği çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bu çalışmalardan bazıları şu şekildedir: Habibi vd. toplama-demontaj problemi için iki aşamalı yinelemeli sezgisel bir formül önermiştir (Habibi vd., 2017a). Daha sonra Habibi vd. TTZ'de toplama-demontaj problemini tanıtmış ve çeşitli formülasyonlar önermiştir (Habibi vd., 2017b). Habibi vd., belirsizlik altında toplama-demontaj problemini ele almış ve hem MÖS ürünlerin toplanmasında hem de demontaj işleminden sonra çıkan bileşenlerin dağıtımında ARP içeren problemi çözmek için örnek ortalama yaklaşımı önermiştir (Habibi vd., 2019).

Son yıllarda artan çevresel kaygılar, kapalı döngü tedarik zinciri (KDTZ) ağlarının tasarım ve optimizasyon ihtiyacını doğurmuştur. Mevcut çalışmalar genellikle KDTZ ağ tasarımı ve hat dengeleme kararlarını ayrı ayrı değerlendirirken, bu makale talep ve getiri belirsizliği altında montaj ve demontaj hat dengelemesiyle entegre bir KDTZ ağ tasarımı problemine odaklanmaktadır. Yolmeh ve Saif'in önerdiği KDTZ ağı; üreticiler, yeniden üretim merkezleri, montaj merkezleri, ara merkezler (demontaj hatlarının bulunduğu yer) ve müşteri merkezlerini içermektedir. Bu problem için yeni bir karma tamsayı doğrusal olmayan programlama modeli ve geliştirilmiş bir ayrıştırma yaklaşımı sunulmuştur. Hesaplama sonuçları, önerilen ayrıştırma yaklaşımının verimliliğini, özellikle de çalışma süreleri açısından mevcut yaklaşımlara göre önemli avantajlarını ve tedarik zinciri ağı tasarımı ile hat dengeleme kararlarının entegrasyonunun önemini göstermektedir (Yolmeh & Saif, 2021).

Diri Kenger vd. (2020b), entegre DHD ve ARP 'yi (E-DHD-ARP) tanıtmış, DHD ve ARP problemlerini eşzamanlı olarak optimize etmiştir. E-DHD-ARP 'de, tek bir demontaj merkezi önce MÖS ürünlerini demonte eder. Daha sonra sabit kapasiteli bir araç, kullanılabilir demonte bileşenleri yeniden üretim merkezlerine taşır. Yazarlar, MÖS

ürünlerinin geri dönüşümü için bir DM ve geri dönüştürülmüş bileşenler talep eden birkaç yeniden üretim tesisi (müşteri) olduğunu varsaymıştır. Başka bir deyişle, tüm yeniden üretim tesislerinin talebi, tek bir merkezden karşılanmaktadır. Makalede 5 farklı durum için 5 farklı matematiksel model önerilmiştir (Diri Kenger vd., 2020b).

Diri Kenger vd. (2020a), 3B yazıcılarla entegre DHD ve ARP'yi (E-DHD-ARP-3B) tanıtmışlardır. Çalışmaya göre 3B baskı teknolojisiyle, sadece gerekli miktarda malzeme kullanarak üretimde atık madde sorununun önüne geçilecek ve bu sayede çevre kirliliğini önleyecek bir model sunulmuştur. E-DHD-ARP-3B çalışması, DHD ve ARP konusunda üç farklı modeli tanıtmaktadır. Tanımlanan problemleri çözmek için çeşitli matematiksel formülasyonlar geliştirilmiş ve senaryo analizleri üzerinde kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Diri Kenger vd., 2020a).

Diri Kenger vd. (2021a) daha sonra, entegre toplama-demontaj-dağıtım problemini (E-TDDP) tanıtmışlardır. E-TDDP; bir DM, toplama merkezleri ve yeniden üretim merkezlerinden oluşmaktadır. E-TDDP 'de toplama merkezlerindeki MÖS ürünler öncelikle demontaj merkezine taşınır. Bu ürünler daha sonra demontaj merkezinde parçalarına ayrılır ve geri dönüştürülmüş bileşenler talep üzerine yeniden üretim merkezlerine teslim edilir. Araç rotalama, MÖS ürünlerinin toplanmasında ve geri dönüştürülmüş bileşenlerin dağıtımında ortaya çıkar. E-TDDP, TTZ ağının DHD ve ARP problemi ile optimizasyonudur. Farklı senaryolar için iki karma tamsayılı matematiksel formülasyon önermektedir (Diri Kenger vd., 2021a).

Diri Kenger vd. (2021b) daha sonra, mobil eklemeli üretimle entegre, DHD ve ARP'yi (E-DHD-ARP-MEÜ) tanıtmışlardır. Bu çalışmada ise MÖS ürünler öncelikle tek bir demontaj merkezinde demonte edilir. Ardından 3B yazıcıyla donatılmış bir araç ile hem geri dönüştürülmüş hem de 3B yazıcılarla yazdırılmış bileşenler, müşterilere yani yeniden üretim merkezlerine gönderilir. Talep edilen bileşenlerin bir kısmı demontaj merkezinde ortaya çıkan bileşenlerden alınmakta, geri kalan kısmı ise yolda 3B yazıcıda üretilmektedir. E-DHD-ARP-MEÜ için doğrusal olmayan bir matematiksel programlama modeli formüle edilmiştir. Gerçek bir ürün üzerinden sayısal bir örnek eşliğinde deneyler yapılmıştır (Diri Kenger vd., 2021b).

Çil vd. (2023a), literatüre ilk kez entegre dağıtılmış demontaj hattı dengeleme ve araç rotalama problemini tanıtmaktadır. Dağıtılmış demontaj merkezlerinden fabrikalara araç rotalama kararlarının entegrasyonu hem endüstriye hem de literatüre katkı sağlamaktadır. Bu katkı sadece yeni problem tanımıyla sınırlı kalmayıp, karma tamsayılı doğrusal programlama, karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama ve kısıt

programlama gibi yeni çözüm metodolojileri de geliştirilmiştir. Ayrıca, büyük boyutlu örnekleri çözmek için çok başlangıçlı simüle edilmiş tavlama algoritması önerilmiştir. Yapılan hesaplamalı analizler, önerilen yöntemlerin iyi kalitede çözümler sunduğunu göstermektedir. Fabrikaların talebini karşılamak için DM'lerde MÖS ürünlerin demonte edilmesiyle oluşan bileşenlerin, yeniden üretim fabrikalarına dağıtılması gerekmektedir. Dağıtılmış DM 'ler tedarik zincirinde daha fazla esneklik sağlar; ancak, yeniden üretim tesislerinin DM'lere açılmasına ilişkin ek bir yatırım yapılması gerektirdiğinden, demontaj ve teslimat kararını tek bir DM'ye göre daha karmaşık hale getirir. Özetle, dağıtık DM'lerin demontaj ve teslimat planlaması şu kararları içermektedir: yeniden üretim tesislerinin DM'lere atanması, her bir DM'nin DHD ve her bir DM'nin araç ağının yönlendirilmesi gerekmektedir (Çil vd., 2023a).

Taşoğlu ve Ilgın (2024) çalışmalarında, tersine lojistik ağ tasarımı ve DHD ile sıralama kararlarının ortak optimizasyonu için simülasyon tabanlı bir genetik algoritma yaklaşımı önermiştir. Tersine lojistik ağ tasarımı ve DHD kararları genellikle ayrı ayrı ele alınır. Ayrıca, demontaj sıralamasının DHD üzerindeki etkisi göz ardı edilir. Ancak şirketler tersine lojistik, DHD ve demontaj sıralaması konularını aynı anda ele alarak daha iyi kararlar alabilirler. Bu entegre yaklaşım, maliyeti ve boşta kalma süresini azaltırken, verimi ve müşteri memnuniyetini en üst düzeye çıkaran daha verimli süreçlerle sonuçlanır (Tasoglu & Ilgın, 2024).

Hu vd. (2024), çalışmalarında, MÖS ürünlerinin tedarigi, bileşen talebi ve demontaj görev sürelerinin belirsiz olduğu çoklu MÖS ürünler için yeni bir entegre TTZ ağ tasarımı ve DHD problemini incelemektedir. Bu karmaşık problem; demontaj tesislerinin sayısı ve yerleri, demontaj ekipmanı tedarigi, demontaj hattı dengelemesi ve MÖS ürünlerinin envanter seviyelerini aynı anda belirlemeyi gerektirir. Temel amaçlar, beklenen kârı maksimize etmek ve karbon emisyonlarını en aza indirmektir. Problemi çözmek için, iki amaçlı iki aşamalı stokastik programlama modeli formüle edilmiş ve kesin bir ϵ -kısıtlı yöntem önerilmiştir (Hu vd., 2024).

Durmaz ve Budak (2025) çalışmalarında, geri dönüşümden en yüksek verimi almak için demontaj hatlarının etkin tasarımı ve ürün dağıtım planlamasının kritik rolü vurgulanmaktadır. Daha önce ayrı ayrı ele alınan kısmi DHD ve çok amaçlı yeşil ARP'lerini ilk kez bütünleşik bir şekilde optimize etmiştir. Bu entegre problem, toplam CO2 emisyonunu ve maliyeti en aza indirmeyi hedefleyen bir Çok Amaçlı Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama modeli olarak formüle edilmiştir. Bu çözümler, demontaj merkezindeki iş istasyonu sayısını, görev atamalarını, iş istasyonu sürelerini,

boşta kalma sürelerini ve araçların optimum dağıtım rotalarını kapsamaktadır (Durmaz & Budak, 2025).

Çizelge 2.1'de görüldüğü üzere, literatürde DHD problemine ARP entegre eden az sayıda çalışma mevcuttur. Çalışmalardan sadece beşi, bir tedarik zincirindeki farklı karar seviyelerini birleştirmek için DHD 'nin ARP ile entegrasyonunu ele almaktadır. Çözüm metodolojileri ile ilgili olarak, doğrusal veya doğrusal olmayan matematiksel modeller geliştirerek kesin çözüm tekniklerini ele almaktadırlar. Yapılan çalışmaların hiçbirisi problemi belirsizlik altında incelenmemiştir. İlk defa bu tez çalışmasında bu iki problemin entegrasyonu, bulanık talep altında dikkate alınarak incelenmiştir. Açıklanan literatürün karşılaştırması Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Literatürdeki Örnek Çalışmaların Kıyaslanması

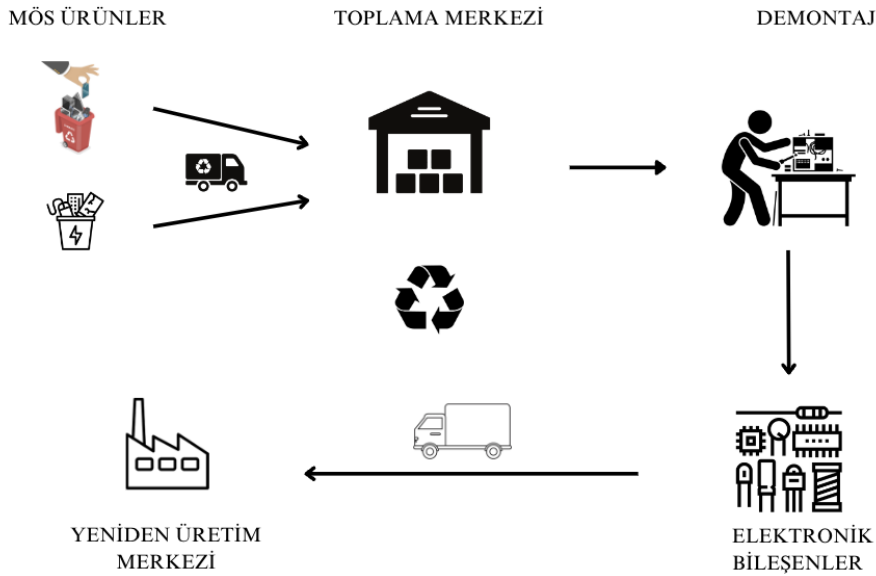
Çalışma	MHD	DHD	ARP	KDTZ	TTZ	KÜ	DP	DOP	KP	Sezgisel Algoritma	Belirsizlik
(Özceylan vd., 2014b)		?		?				?			
(Özceylan & Paksoy, 2014)		?			?			?			Bulanık
(Kannan vd., 2017b)		?			?			?			
(Diri Kenger vd., 2020b)		?	?				?	?			
(Diri Kenger vd., 2020d)		?	?			?		?			
(Diri Kenger vd., 2021a)		?	?		?		?				
(Diri Kenger vd., 2021b)		?	?			?		?			
(Yolmeh & Saif, 2021)	?	?		?				?			Stokastik (Rassal)
(Çil vd., 2023b)		?	?				?	?	?	?	
(Durmaz & Budak, 2024)		?	?		?		?				
(Hu vd., 2024)		?			?		?				Stokastik
(Habibi, vd., 2017a)		?			?						
(Habibi, vd., 2017b)		?	?		?		?				
(Tasoglu & Ilgın, 2024)		?			?					?	Stokastik
Mevcut çalışma		?	?		?		?	?			Bulanık

MHD: Montaj hattı dengeleme, DHD: Demontaj hattı dengeleme, ARP: Araç rotalama problemi, KDTZ: Kapalı döngü tedarik zinciri, TTZ: Tersine tedarik zinciri, DP: Doğrusal programlama; DOP: Doğrusal olmayan programlama, KÜ: Katmanlı üretim, KP: Kısıt programlama.

3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYONLAR

Tez çalışmamızda TTZ faaliyetleri genel olarak üç gruba ayrılır; MÖS ürünlerin toplanması, MÖS ürünlerin demontajı aşamasında demontaj hatlarının dengelenmesi ve son olarak demontaj neticesinde çıkan bileşenlerin dağıtılmasıdır. Demontaj işleminden sonra kullanılabilir düzeydeki bileşenler talep merkezlerine dağıtılır. Önerilen entegre model aynı anda iki ana problemten oluşmaktadır: DHD problemi ve ARP eşzamanlı optimizasyonu. İki problemin çözümü birlikte sağlanırken kullanılabilir bileşenlerin talep merkezlerine dağıtımını bulanık talep altında incelenmektedir. Önerilen modelde yeniden üretim merkezleri tek bir bileşen ya da birden fazla türde bileşen talep edebilmektedir. Problem tek bir demontaj merkezi, tek tip ürün ve çoklu bileşenlerden oluşmaktadır. Demontaj merkezlerinde demonte edilen bileşenlerin, yeniden üretim merkezlerine dağıtılması gerekmektedir. Deponun hangi yeniden üretim merkezinin ihtiyacını karşılayacağı kararı; araçların güzergahını, nakliye maliyetini ve demontaj merkezlerindeki demontaj hatlarının çevrim süresini etkilemektedir. Bu nedenle, toplam iş istasyonu sayısını ve nakliye maliyetlerini en aza indirmek için DHD ve ARP'nin aynı anda çözülmesi gerekmektedir. Anlatılan, Bulanık Talep Altında Bütünleşik Toplama-Demontaj-Dağıtım Probleminin akış şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

BÜTÜNLEŞİK TOPLAMA-DEMONTAJ-DAĞITIM PROBLEMİ PROBLEMİ ŞEMASI



Şekil 3.1. Bütünleşik Toplama-Demontaj-Dağıtım Problemi Şeması

Ele aldığımız tez çalışmasında demontaj işlemi sonrasında oluşan bileşenlere yönelik talepler bulanık mantık altında incelenmiştir. Taleplerdeki belirsizlik durumunu incelemek için iki model önermekteyiz:

Model-1: Demontaj işlemi neticesinde oluşan bileşenlerin bir tanesine talep olduğu varsayılmaktadır.

Model-2: Demontaj işlemi neticesinde oluşan tüm bileşenlere talep olduğu varsayılmaktadır.

Model-1'i test etmek için Augerat vd. en küçük veri seti (P_n16_k8) modifiye edilmiş ve 16 node 2 parçaya ayrılarak toplama ve talep merkezleri oluşturulmuştur (Augerat vd., 1995). Demontaj işlemi sonucunda parçalarına ayrılan oyuncak araba bileşenlerinden sadece bir tanesine talep olduğu varsayılmaktadır.

Model-2'yi test etmek için Tang tarafından sunulan, 10 görev ve 7 bileşenden oluşan el feneri örneği kullanılmıştır (Tang, 2002). Demontaj işlemi sonucunda parçalarına ayrılan el feneri bileşenlerinin hepsine talep olduğu varsayılmaktadır.

Problemi çözmek için Model-1'de karma tamsayılı doğrusal programlama (KTDP), Model-2'de ise karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama (KTDOP) modeli önerilmiştir. Model-2'de yeniden üretim merkezleri birden fazla türde bileşen talep etmektedir. Model-1 tek bir demontaj merkezi, tek tip ürün ile ilgilidir. Model-2 ise çoklu bileşen ile ilgilidir. Formülasyon, Diri Kenger vd. tarafından önerilen E-DHD-RP genişletilerek geliştirilmiştir (Diri Kenger vd., 2021a). Model-1 için varsayımlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Yalnızca bir ürün türü tamamen demonte edilir.
- Bir görev iki veya daha fazla iş istasyonu arasında bölünemez.
- Tüm iş istasyonları herhangi bir görevi işleme kapasitesine ve aynı ilişkili maliyetlere sahiptir.

- Her demontaj işlemi ürünü veya alt montajı, tam olarak iki veya daha fazla yeni alt montaja ayırır.
- Araç kapasiteleri bilinmektedir.
- Araçlar yeniden üretim merkezlerine servis için hazırdır.
- Yeniden üretim merkezlerinin talepleri belirsizdir ve tam olarak karşılanmalıdır.
- Bir yeniden üretim merkezinin toplam talebi araç kapasitesini aşamaz.
- Toplama merkezleri, demontaj merkezine tek bir tür MÖS ürün sağlar.

Model-2 için ek varsayımlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Tüm yeniden üretim merkezleri birden fazla türde bileşene ihtiyaç duyar.

İNDEKS

c, g	Yeniden üretim merkezi, $c, g = \{1, 2, \dots, N\}$
m, t	Toplama merkezi, $m, t = \{1, 2, \dots, E\}$
i	Görev
k	Bileşen
j, h	İş istasyonu
A	Yapay görev

Kümeler ve parametreler:

A_a	A 'nın yapay düğümleri
B_i	i 'nin normal düğümleri
$P(A_a)$	A_a 'nın öncül kümesi
$P(B_i)$	B_i 'nin öncül kümesi
$S(A_a)$	A_a yapay düğümünün hemen ardıl kümesi
$S(B_i)$	B_i yapay düğümünün hemen ardıl kümesi

d_{B_i}	B_i (s) 'nin görev süresi (normal düğüm)
J	İş istasyonu sayısı (üst sınır)
W_{time}	Çalışma süresi (s)
De_{gk}	k Bileşeni için g yeniden üretim merkezinin talebi
$\widetilde{De}_{gk}$	<i>k Bileşeni için g yeniden üretim merkezinin bulanık talebi</i>
C_t	Demontaj merkezinden yeniden üretim merkezine g veya toplama merkezine t Sabit nakliye maliyeti (cents-sent)
Sc	Bir ürünü demonte etmek için sabit maliyet (sent)
CI	Bir bileşeni stoklamak için sabit maliyet
μ	Büyük sayı (istasyona atanabilecek maksimum görev sayısı+1)
D_{cg}	Demontaj merkezi ile yeniden üretim merkezi arasındaki veya yeniden üretim merkezleri arasındaki mesafe (km)
Q	Demontaj hattında bir iş istasyonu açmak için sabit maliyet (\$/iş istasyonu)
Q_1	MÖS ürünleri toplayan aracın kapasitesi (birim)
Q_2	Bileşenleri dağıtan aracın kapasitesi (birim)
Pr	Talebi karşılayan kar
S_t	Toplama merkezi t arzı (birim)
DC_{mt}	Demontaj merkezi ile toplama arasındaki veya toplama merkezleri arasındaki mesafe (km)

Tamsayı Değişkenler:

U_g	Yeniden üretim merkezine uğradıktan sonra aracın yükü
UU_t	m toplama merkezine uğradıktan sonra aracın yükü
I_k	k bileşeninin envanter seviyesi
P	Demontaj hattındaki demonte ürünlerin sayısı
Cyc	Çevrim süresi (s)

İkili Değişkenler:

x_{ij}	B_i görevi j iş istasyonuna atanmışsa 1, aksi takdirde 0
----------	--

y_{cg}	Araç demontaj merkezinden yeniden üretim merkezine veya yeniden üretim merkezleri arasında seyahat ediyorsa 1, aksi takdirde 0
yy_{mt}	Araç demontaj merkezinden toplama merkezine veya toplama merkezleri arasında seyahat ediyorsa 1, aksi takdirde 0
z_i	B_i görevi gerçekleştirilirse 1, aksi takdirde 0
F_j	j iş istasyonu açılırsa 1, aksi takdirde 0

3.1. Model-1 Amaç Fonksiyonu Ve Matematiksel Formüller

$$\text{Min} \quad O * \sum_j^J F_j + Ct * \sum_c^N \sum_{g,g \neq c}^N D_{cg} * y_{cg} + Ct * \sum_m^E \sum_{t,m \neq t}^E DC_{mt} * yy_{mt} + CI * I \quad (1)$$

Demontaj Hattı Dengeleme Kısıtları:

$$\sum_{i:B_i \in S(A_0)} z_i = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i:B_i \in S(A_a)} z_i = \sum_{i:B_i \in P(A_a)} z_i \quad \forall a, a \neq 0 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = z_i \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_{i:B_i \in S(A_a)} x_{ih} \leq \sum_{i:B_i \in P(A_a)} \sum_{j=1}^h x_{ij} \quad \forall a, a \neq 0, h \in J \quad (5)$$

Çevrim Süresi Kısıtları:

$$\sum_{i=1}^I X_{ij} * d_{Bi} \leq Cyc * F_j \quad (6)$$

$$Cyc = (W_{time} / (\sum_{g=2}^N De_g)) \quad (7)$$

$$F_{j+1} \leq F_j \quad \forall j, j=1, \dots, J-1 \quad (8)$$

$$\sum_{t=1, t \neq m}^E yy_{mt} \leq 1 \quad \forall m, m = 2, \dots, E \quad (9)$$

$$\sum_{m=1, m \neq t}^E yy_{mt} - \sum_{m=1, m \neq t}^E yy_{tm} = 0 \quad \forall t, t = 1, \dots, E \quad (10)$$

$$UU_m - UU_t + Q * yy_{mt} \leq Q - S_t * yy_{mt} \quad \forall m, t, m, t = 2, \dots, E, m \neq t \quad (11)$$

$$S_m * yy_{1m} \leq UU_m \quad \forall m, m = 2, \dots, E \quad (12)$$

$$S_m * \sum_{t=1}^E y y_{mt} \leq U U_m \quad \forall m, m = 2, \dots, E \quad (13)$$

$$\sum_{g=2}^N D e_g \leq \sum_{m=2}^E \sum_{t=1}^E s_t * y y_{mt} \quad (14)$$

$$\sum_{g=1, g \neq c}^N y_{cg} = 1 \quad \forall c, c = 2, \dots, N \quad (15)$$

$$\sum_{c=1, c \neq g}^N y_{cg} - \sum_{c=1, c \neq g}^N y_{gc} = 0. \quad \forall g, g = 1, \dots, N \quad (16)$$

$$U_c - U_g + Q * y_{cg} \leq Q - \widetilde{D} e_g \quad \forall c, g, c, g = 2, \dots, N, c \neq g \quad (17)$$

$$\widetilde{D} e_g \leq \left[\alpha * \left(\frac{D e_g^{opt} + D e_g^{mos}}{2} \right) + (1 - \alpha) * \left(\frac{D e_g^{pes} + D e_g^{mos}}{2} \right) \right] \quad \forall g, g = 2, \dots \quad (18)$$

$$I = \sum_g^N D e_g^{opt} - \sum_g^N \widetilde{D} e_g \quad g = 2, \dots, N \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^K De_{gk}^{pes} \leq U_g \leq Q \quad \forall g \quad (20)$$

$$0 \leq UU_t \leq Q \quad \forall t \quad (21)$$

$$x_{ij}, z_i, y_{cg}, yy_{mt} F_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j, c, g. \quad (22)$$

Amaç fonksiyonu (1) toplam rota maliyeti ve istasyon açma maliyetini ve stok maliyetini en aza indirger. Kısıt (2) ve (3), demontaj merkezinde yalnızca bir VEYA-a rdılının seçilmesini garanti eder. Kısıt (4), her bir görevin demontaj merkezinde yalnızca bir iş istasyonuna atanmasını zorunlu kılar. Kısıt (5), görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin korunmasını sağlar. Kısıtlar (6) ve (7), demontaj hattında çevrim zamanının belirlenmesini sağlar. Kısıt (8) ise iş istasyonlarının sıralı bir biçimde etkinleştirilmesini garanti altına alır. Kısıt (9), her bir toplama merkezinin mutlaka ziyaret edilmesi gerekmediğini ifade eder. Kısıt (10), toplama merkezleri arasındaki akışın sürekliliğini sağlar. Kısıt (11)–(13) ise kapasiteye ilişkin sınırlamaları dikkate alır. Kısıt (14) toplam arzın toplam talepten az olamayacağını garanti eder. Kısıt (15-17) kısıtları taleplerin dağıtılması ile ilgili kısıtlardır. Durulaştırma işlemi, Jiménez vd. tarafından önerilen yöntem olarak (18) numaralı kısıt ile sağlanmaktadır. Kısıt (19), stokta kalan parça sayısının hesaplanmasını sağlar. Kısıt (20) – (22) ise modelde yer alan pozitif ve ikili (0-1) karar değişkenlerinin tanımlanmasına yönelik kısıtlamaları ifade eder.

3.2. Model-2 Amaç Fonksiyonu Ve Matematiksel Formüller

$$\begin{aligned}
 \text{Minimize } & 0 * \sum_j^J F_j + Ct * \sum_c^N \sum_{g,g \neq c}^N D_{cg} * y_{cg} + Ct \\
 & * \sum_m^E \sum_{t,m \neq t}^E DC_{mt} * yy_{mt} + Sc * P + CI * \sum_k^K I_k - Pr \\
 & * \sum_c^N \sum_{g,g \neq c}^N \sum_k^K \widetilde{De}_{gk} * y_{cg}
 \end{aligned} \tag{23}$$

Demontaj Hattı Dengeleme Kısıtları:

$$\sum_{i:B_i \in S(A_0)} z_i = 1 \tag{24}$$

$$\sum_{i:B_i \in S(A_a)} z_i = \sum_{i:B_i \in P(A_a)} z_i \quad \forall a, a \neq 0 \tag{25}$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = z_i \quad \forall i \tag{26}$$

$$\sum_{i:B_i \in S(A_a)} x_{ih} \leq \sum_{i:B_i \in P(A_a)} \sum_{j=1}^h x_{ij} \quad \forall a, a \neq 0, h \in J \tag{27}$$

Çevrim Süresi Kısıtları:

$$Cyc * P = W_{time} \tag{28}$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} * d_{B_i} \leq Cyc \quad \forall j \tag{29}$$

Demontaj Hattı Sıralı İş İstasyonu Kısıtları:

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} \leq \mu * F_j \quad \forall j \quad (30)$$

$$F_{j+1} \leq F_j \quad \forall j, j = 1, \dots, J - 1 \quad (31)$$

Taleplerin Dağıtılması ile İlgili Kısıtlar:

$$\sum_{g=1, g \neq c}^N y_{cg} = 1 \quad \forall c, c = 2, \dots, N \quad (32)$$

$$\sum_{c=1, c \neq g}^N y_{cg} - \sum_{c=1, c \neq g}^N y_{gc} = 0 \quad \forall g, g = 1, \dots, N \quad (33)$$

$$U_c - U_g + Q_2 * y_{cg} \leq Q_2 - \sum_{k=1}^K \widetilde{De}_{gk} \quad \forall c, g, c, g = 2, \dots, N, c \neq g \quad (34)$$

$$\sum_{t=1, t \neq m}^E y y_{mt} \leq 1 \quad \forall m, m = 2, \dots, E \quad (35)$$

$$\sum_{m=1, m \neq t}^E y y_{mt} - \sum_{m=1, m \neq t}^E y y_{tm} = 0 \quad \forall t, t = 1, \dots, E \quad (36)$$

Kapasite Sınırlamaları Kısıtları:

$$UU_m - UU_t + Q_1 * yy_{mt} \leq Q_1 - S_t * yy_{mt}$$

$$\forall m, t, m, t = 2, \dots, E, m \neq t \quad (37)$$

$$S_m * yy_{1m} \leq UU_m \quad \forall m, m = 2, \dots, E \quad (38)$$

$$S_m * \sum_{t=1}^E yy_{mt} \leq UU_m \quad \forall m, m = 2, \dots, E \quad (39)$$

$$\sum_{g=2}^N \sum_{k=1}^K \widetilde{De}_{gk} \leq \sum_{m=2}^E \sum_{t=1}^E S_t * yy_{mt} \quad (40)$$

$$I_k = P - \sum_{c=1}^N \sum_{g=2, c \neq g}^N \widetilde{De}_{gk} * y_{cg} \quad \forall k \quad (41)$$

Karar Değişkeni Kısıtları:

$$\sum_{k=1}^K \widetilde{De}_{gk} \leq U_g \leq Q \quad \forall g \quad (42)$$

$$0 \leq UU_t \leq Q \quad \forall t \quad (43)$$

$$x_{ij}, z_i, y_{cg}, y_{mt} F_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j, c, g. \quad (44)$$

Amaç fonksiyonu (23), taleplerin karşılanmasıyla elde edilen karı göz önünde bulundurarak iş istasyonları, rotalama, envanter ve ürünlerin demontajı dahil olmak üzere toplam maliyeti en aza indirir. Kısıtlar (24) ve (25), demontaj merkezinde tam olarak bir VEYA-ardılının seçilmesini sağlar. Kısıt (26), her bir görevin demontaj merkezinde tam olarak bir iş istasyonuna atanması gerektiğini belirtir. Kısıt (27) öncelik ilişkilerini sağlar. Çevrim süresi, toplam çalışma süresinin demonte edilen ürünlere bölünmesiyle hesaplanır (28). Kısıt (29), demontaj iş istasyonu süresinin çevrim süresini aşmamasını sağlar. Kısıt (30) bir iş istasyonu açıldıktan sonra görev atamalarına izin verir. Kısıt (31) iş istasyonlarının sırayla açılmasını temin eder. Kısıt (32) her bir yeniden üretim merkezinin tam olarak bir kez ziyaret edilmesini sağlar. Kısıt (33) yeniden üretim merkezleri için akışı tanımlar. Kısıt (34) araç kapasite kısıtıdır. Kısıt (35) tüm toplama merkezlerinin ziyaret edilmesinin zorunlu olmadığını belirtir. Kısıt (36) toplama merkezleri ile ilgili akışı sağlar. Kısıtlar (37)-(39) kapasite sınırlamalarını temsil etmektedir. Kısıt (40) toplama merkezlerinden gelen toplam arzın yeniden üretim merkezlerinin talebini karşılamasını sağlar. Kısıt (41), demontaj merkezindeki envanter dengesini korur. Kısıtlar (42)-(44) yeniden üretim merkezinin talebini ve yeniden üretim merkezine uğradıktan sonra aracın yükünün karar değişkenlerine etki alanını belirler.

Önerilen model, bulanıklaştırma gerektiren üçgensel bulanık sayılar içeren kısıtlar içermektedir. Çeşitli araştırmacılar bulanık matematiksel modelleri net deterministik modellere dönüştürmek için yöntemler sunmuşlardır (Jimenez vd., 2007; Zimmermann, 2001). Belirsizliği dikkate almak için Jiménez vd. (2007), tarafından önerilen yöntem kullanılmaktadır; çünkü bu yöntem, durulaştırmayı (defuzzification) ek bir eşitsizlik kısıtı getirirmeden etkin bir şekilde gerçekleştirmektedir (Jimenez vd., 2007). Jiménez vd. tarafından önerilen durulaştırma yaklaşımı, α -fizibilite katsayıları ve sıralama yöntemlerini kullanarak bulanık kısıtların fizibilitesini ele almaya odaklanmaktadır. Bu teknikler uygulanarak, bulanık kısıtlar belirli bir fizibilite seviyesi korunarak net deterministik kısıtlara dönüştürülür. Jiménez vd. tarafından önerilen yöntemle göre, durulaştırma (45) numaralı kısıt tarafından sağlanmaktadır (Jiménez vd., 2007). Üçgensel bulanık parametrelerin üç temel değeri; en kötümser, en olası ve en iyimserdir. Bu

değerler sırasıyla pes, mos ve opt ile temsil edilir. Kısıt (34), talep belirsizliği göz önünde bulundurularak sistemin belirli bir aralıkta çalışmasını sağlayan Kısıt (46) ile değiştirilir.

$$\widetilde{De}_{gk} \leq \left[\alpha * \left(\frac{De_{gk}^{opt} + De_{gk}^{mos}}{2} \right) + (1 - \alpha) * \left(\frac{De_{gk}^{pes} + De_{gk}^{mos}}{2} \right) \right] \quad \forall g, k, \quad (45)$$

$$g = 2, \dots, N$$

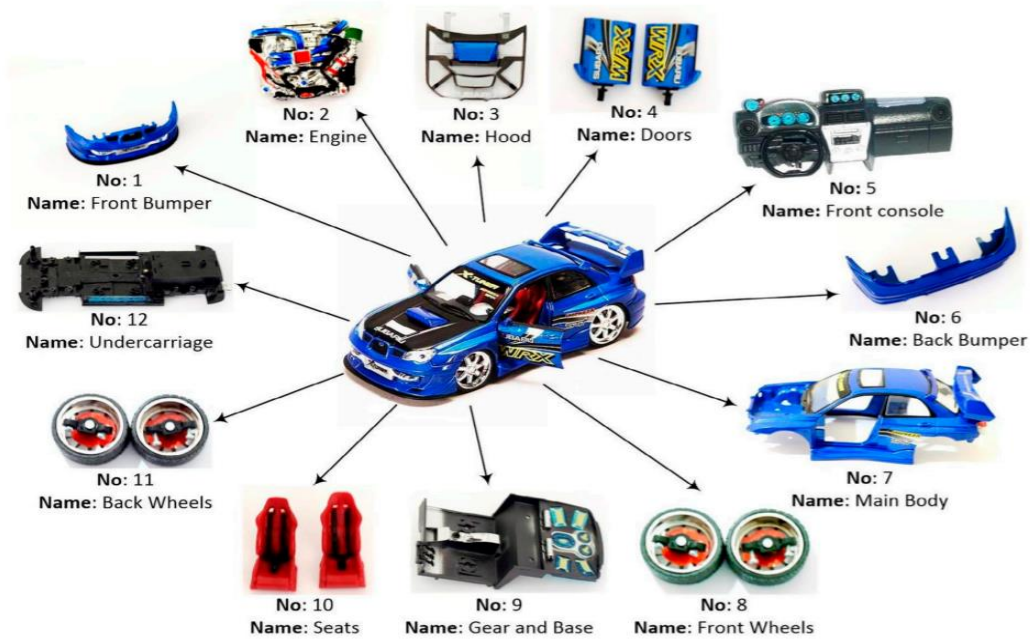
$$\sum_{k=1}^K De_{gk}^{pes} \leq U_g \leq Q \quad \forall g \quad (46)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI, SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde önerilen model için hesaplama deneyleri yapılmaktadır. Örneklerin oluşturulması bölüm 4.1'de açıklanmıştır. Modeli test etmek için Bölüm 4.2'de açıklayıcı bir örnek sunulmuştur. Son olarak, Bölüm 4.3'te senaryo analizinin sonuçları verilmektedir. Tüm deneyler Intel Core i5-8250U 1.6 GHz çift işlemcili ve 8.00 GB belleğe sahip bir sunucu üzerinde gerçekleştirilmiştir. GAMS/SCIP matematiksel modeli çözmek için optimizör olarak kullanılmıştır. Model-1 ve Model-2'yi test etmek için ayrı veri setleri kullanılmış bölüm 4.1'de açıklanmıştır.

4.1. Veri Üretimi Ve Kıyaslama Örnekleri

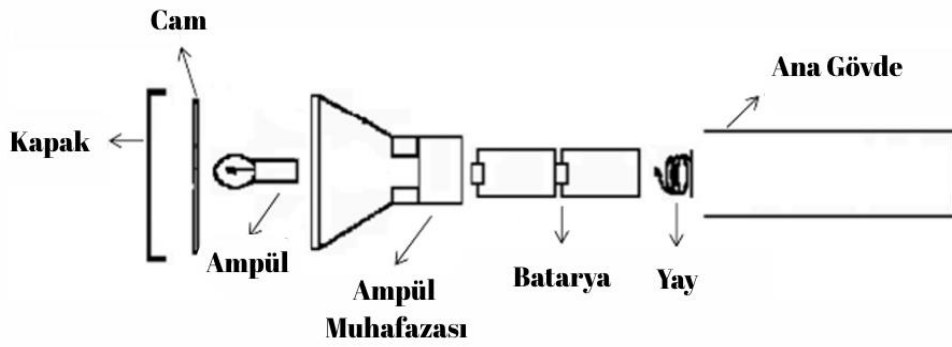
Model-1'in Rotalama aşamasını test etmek için Augerat vd.(1995) tarafından en küçük veri seti (P_n16_k8) modifiye edilmiş ve 16 parçaya ayrılarak toplama ve talep merkezleri oluşturulmuştur (Augerat vd., 1995). Talep merkezi tarafından Şekil 4.1'de belirtilen oyuncak araba parçalarından sadece bir tanesine talep olduğu varsayılmaktadır. Önerilen matematiksel model GAMS/SCIP çözücü kullanılarak test edilmiştir.



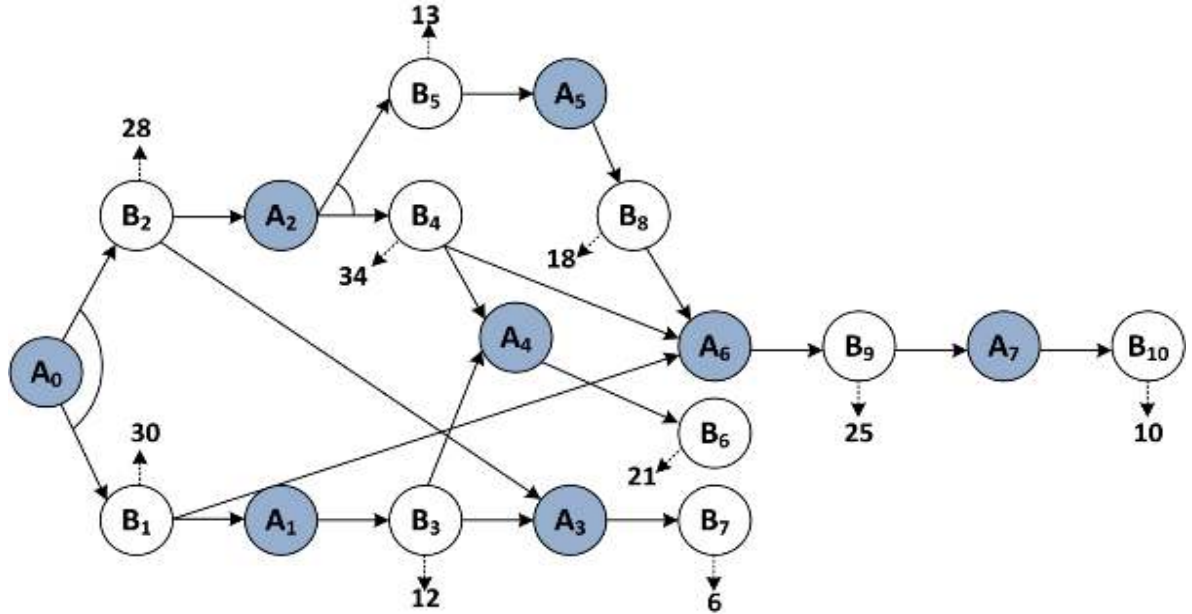
Şekil 4.1. Örnek – Oyuncak Araba Demontajı

Model-2'yi test etmek için literatürdeki iyi bilinen veri kümelerinden faydalanılmıştır. DHD için Tang tarafından sunulan, 10 görev ve 7 bileşenden oluşan el

feneri örneği kullanılmıştır (Tang, 2002). El fenerinin demonte edilmesi sonucunda ortaya çıkan bileşenlerin tümüne talep olduğu varsayılmaktadır. Şekil 4.2’de el feneri bileşenleriyle birlikte gösterilirken, Şekil 4.3’de el feneri için Dönüştürülmüş VE/VEYA diyagramı (Paksoy vd., 2013) sunulmaktadır. VE/VEYA grafiğinde her bir alt montaja karşılık gelen her düğüm, dönüştürülmüş VE/VEYA grafiğinde yapay bir düğümle gösterilmektedir. El fenerinin yapay düğümleri ($A_0, 1, 2, \dots, 7$), normal düğümleri ($B_1, 2, \dots, 10$) ve görev süreleri ile birlikte dönüştürülmüş VE/VEYA grafiği Şekil 4.3’te gösterilmektedir.



Şekil 4.2. El Feneri Bileşenleri



Şekil 4.3. Dönüştürülmüş VE / VEYA Grafiği

ARP aşaması için, P kümesinden en küçük veri seti (P_n16_k8) uyarlandı ve test durumlarını oluşturmak için klasik ARP örnekleri değiştirildi (Augerat rc vd., 1995). P kümesindeki en küçük veri setini (P_n16_k8), koordinatlarını değiştirmeden ilk düğümü demontaj merkezi, beş düğümü yeniden üretim merkezi ve beş düğümü de toplama merkezi olarak belirleyerek değiştirildi. Arz ve talep özellikleri sırasıyla [10-20] ve [1-6] aralığında ayrık tekdüze dağılımlardan üretilmiştir. Çizelge 4.1 talep değerlerini göstermektedir; B talep edilen bileşenleri temsil etmektedir. Burada B1 ile B7 sırasıyla 1 ila 7 arasındaki bileşenleri temsil etmektedir. YÜ yeniden üretim merkezini, TM toplama merkezlerini ifade etmektedir. Çizelge 4.1 arz verilerini sağlamaktadır. Çizelge 4.2 ise toplama merkezleri için arz miktarlarını ifade etmektedir.

Çizelge 4.1. Yeniden Üretim Merkezleri İçin En Olası Talepler

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
YÜ1	3	1	4	3	2	1	2
YÜ2	2	4	3	2	3	1	2
YÜ3	1	1	6	2	2	1	3
YÜ4	2	1	2	3	4	3	4
YÜ5	1	1	5	2	1	2	1

Çizelge 4.2. Toplama Merkezleri İçin Arz Miktarları

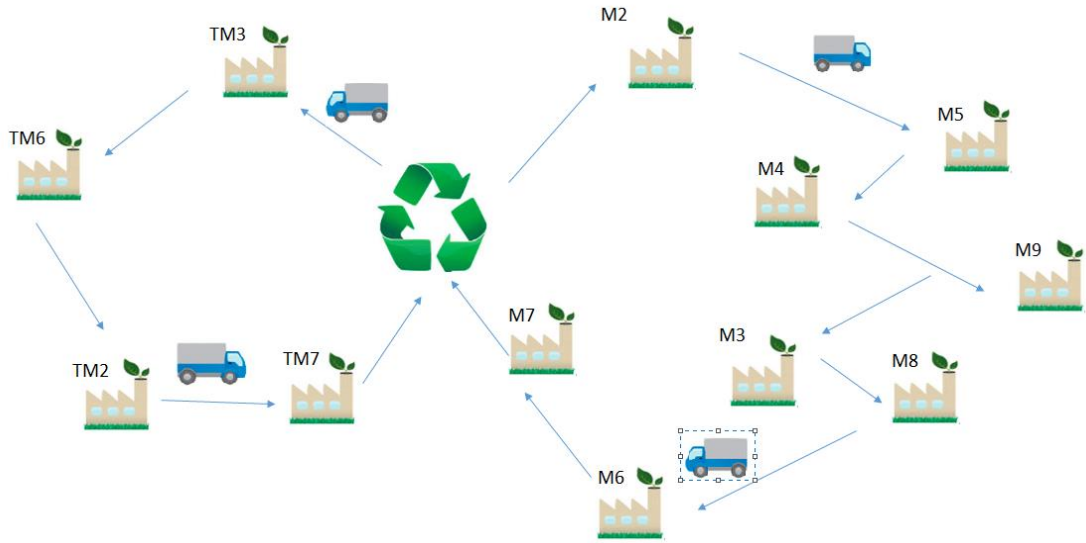
TM	1	2	3	4	5
Arz	11	12	10	15	20

En kötümser ve en iyimser değerler, en olası değerlerin sırasıyla [0,6-0,8] ve [1,2-1,4] aralıklarıyla rastgele çarpılmasıyla elde edilir. Talep değerleri tam sayı olduğu için kötümser değerler aşağı yuvarlanırken iyimser değerler yukarı yuvarlanır.

Çalışma süresi (W_time) 1250 saniye olarak tanımlanmış ve maksimum iş istasyonu sayısı (J) 10 ile sınırlandırılmıştır. Demontaj hattındaki operasyonel maliyet (O) iş istasyonu başına 100 \$ olarak sabitlenmiştir. Nakliye maliyeti (Ct) bir genel yük kamyonu için ton-km başına 5,23 sent olarak belirlenmiştir. Araç kapasiteleri toplama ve dağıtım süreçleri için sırasıyla 35 ve 70 olarak sabitlenmiştir.

4.2. Bulgular

Model-1'in rotalama diyagramı şekil 4.4'te gösterilmiştir. Toplama merkezleri "TM", müşteriler "M" ile gösterilmiştir. GAMS/SCIP matematiksel model çözücü programında test edilmesi sonucunda Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5, Çizelge 4.6'teki veriler elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Model-1 Rotalama Diyagramı

Modeli test etmek için küçük bir veri kümesi kullanılmıştır. Beş toplama ve beş yeniden üretim merkezi dikkate alınmıştır. $\alpha=0.3$ hesaplama deneylerinde kullanılmıştır. Optimal sonuçlar Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Model-1 Çözüm Özeti

Obj (\$)	Inv	CT (sec)	CPU (sec)
550.49	8	56.81	248.97

Çizelge 4.4. Model-1 Örnek Problem Amaç Fonksiyonu Sonuçları

TOTAL	550.495
TOPLAMA MALİYETİ	5.643
İSTASYON MALİYETİ	500.000
DAĞITIM MALİYETİ	4.852

Çizelge 4.4 de modelin optimal bir çözüm bulduğu görülmektedir. Çizelgede amaç fonksiyonu (OBJ) ile alt bileşenleri (OBJ 1, OBJ 2, OBJ 3) hakkında bilgi verilmektedir. Bu, modelin çok bileşenli bir optimizasyon problemi çözdüğünü gösterir. Örneğin, bu bileşenler farklı maliyet türlerini (üretim maliyeti, taşıma maliyeti, sabit maliyet) veya farklı hedefleri (zaman, mesafe, çevresel etki) temsil eder.

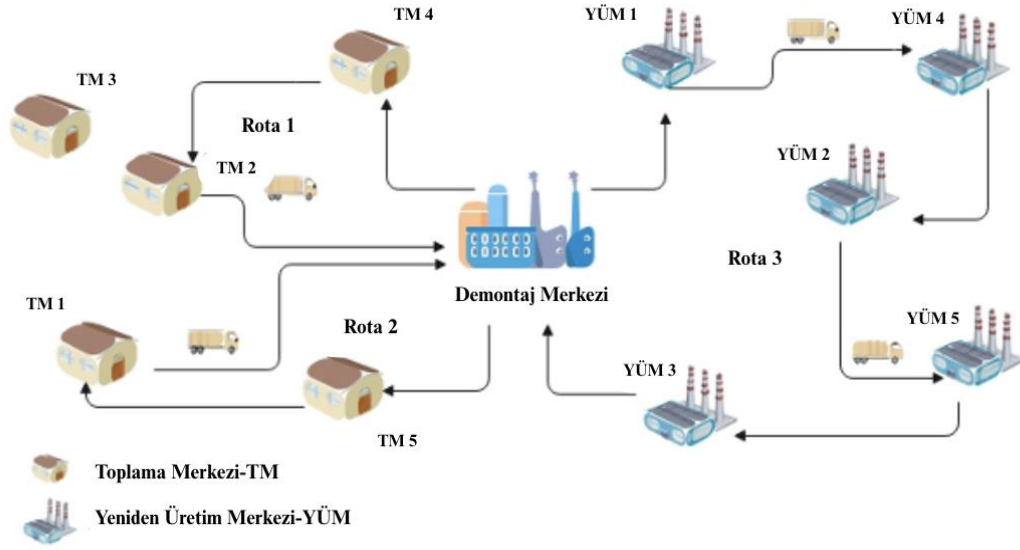
Çizelge 4.5. Model-2 Örnek Problem Sonuçları

Obj (\$)	Inv	CT (sec)	CPU (sec)
72.057	1	178.571	809.85

Çizelge 4.5 de görüldüğü üzere model toplam 72.057 \$ maliyetle çözülmüştür. Bu değer, modelin hedef fonksiyonu olan maliyet minimizasyonunun başarıyla uygulandığını göstermektedir. Sistem sonunda yalnızca 1 birimlik envanter kalması, envanter taşıma maliyetlerinin minimize edildiğini ve modelin "tam zamanında üretim" yaklaşımına uygun çözümler sunduğunu düşündürmektedir. 178.571 saniyelik çevrim süresi, üretim hattının toplam işlem süresi hakkında bilgi vermektedir. 809.85 saniyelik işlem süresi, modelin çözümünde karşılaşılan hesaplama karmaşıklığını göstermektedir. Modelin büyük boyutlu veya tamsayılı karar değişkenleri içerdiği tahmin edilmektedir.

Çizelge 4.6. Açıklayıcı Örnek İçin Bileşenlerin Optimum Dağılımı

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
YÜ1	2	1	3	2	2	1	1
YÜ2	1	3	2	2	1	1	1
YÜ3	1	1	1	0	1	1	2
YÜ4	1	1	1	2	3	2	3
YÜ5	1	1	0	1	0	2	0



Şekil 4.5. Belirtilen Örneğin Optimum Dağılımı

4.3. Yönetimsel Analizler

Yönetimsel analizler ilgili olarak, analiz birden fazla boyutta gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, farklı α -seviyelerinin çözümler üzerindeki etkileri incelenmektedir. İkinci aşamada, değişen çalışma sürelerinin sonuçlar üzerindeki etkileri analiz edilmektedir. Daha sonra, farklı demontaj maliyetlerinin çözümleri nasıl etkilediği araştırılmaktadır. Son olarak, değişen kar marjlarının sonuçlar üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Bu çok boyutlu analizin amacı, yöneticilere karar verme süreçlerini desteklemek için kapsamlı bir rehber sunmaktır.

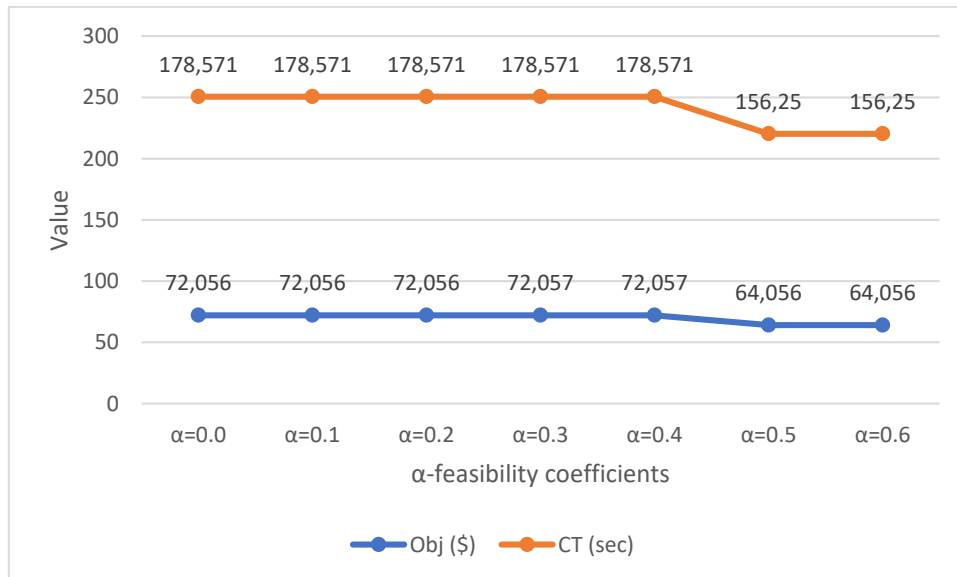
4.3.1. α -Fizibilite Katsayısı Analizi

Bu bölümde, bulanık modelin performansı incelenmiştir. Bulanık modelin performansını değerlendirmek için 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 α seviyeleri kullanılmıştır. Tüm sonuçlar Çizelge 4.7 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.7. α -Fizibilite Katsayısı Analizi

	$\alpha=0.0$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$
Obj (\$)	72.056	72.056	72.056	72.057	72.057	64.056	64.056
CT (sec)	178.571	178.571	178.571	178.571	178.571	156.25	156.25
P	7	7	7	7	7	8	8
Inv	1	1	1	1	1	0	0
CPU (sec)	402.95	659.72	850.03	809.85	894.13	1504.07	2404.14

Çizelge 4.7 değişen α seviyelerinin model sonuçları üzerindeki etkilerini göstermektedir. α 0.0 ile 0.4 arasında değişirken, hedef değer neredeyse sabit kalmaktadır, bu da modelin düşük α değerlerine karşı nispeten duyarsız olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, α 0,5 ve üzerine ulaştığında, hedef değer keskin bir düşüşle 64.056 \$'a inmektedir ve bu da önemli bir maliyet iyileştirmesine işaret etmektedir. Benzer şekilde, Çevrim Süresi (CT) $\alpha \leq 0,4$ için yaklaşık 178,57 saniyede sabit kalmakta, ardından α 0,5'e yükseldikçe 156,25 saniyeye düşmekte ve işlem verimliliğinde kayda değer bir iyileşmeyi yansıtmaktadır. Son olarak, CPU süresi düşük α seviyeleri için 402 ila 895 saniye arasında değişmekte, ancak $\alpha \geq 0,5$ için keskin bir şekilde yaklaşık 1.504-2.404 saniyeye yükselmekte ve daha yüksek α değerleri için gereken önemli hesaplama çabasının altını çizmektedir. Bu sonuçlar, α parametresinin hem karar değişkenlerini hem de modelin hesaplama performansını şekillendirmedeki kritik rolünü açıkça göstermektedir.

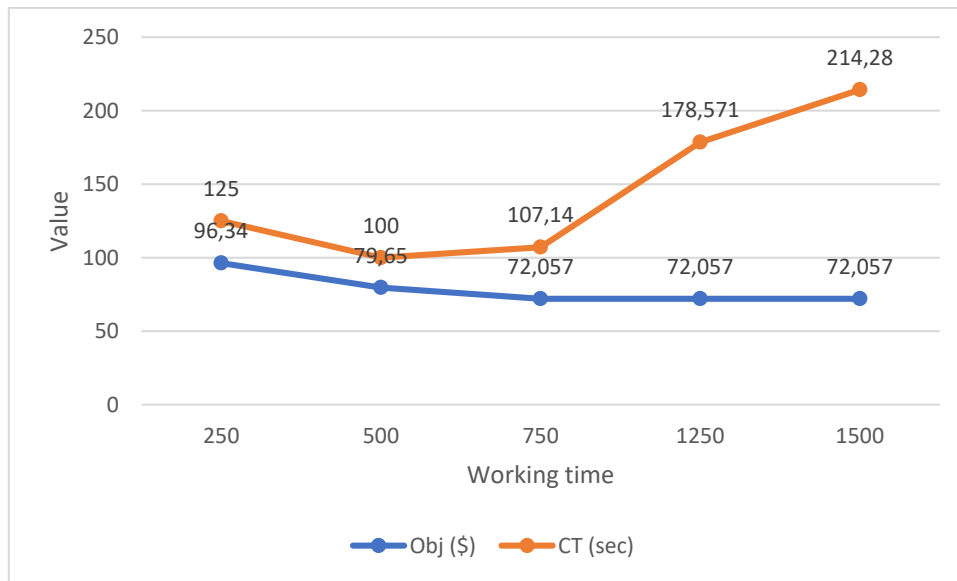
**Şekil 4.6. Fizibilite Katsayıları Analizi Grafiği**

4.3.2. Çalışma Süresi Analizi

Bu bölümde, değişen çalışma sürelerinin (250-1500) önerilen modelin sonuçları üzerindeki etkileri analiz edilecektir (bkz. Çizelge 4.8 ve Şekil 4.7). Çalışma süresi 250 olduğunda, amaç değeri 96,34 \$ ile nispeten yüksektir, ancak çalışma süresi 500'e çıktığında keskin bir şekilde 79,65 \$'a düşer ve 750 ve üzeri çalışma süreleri için yaklaşık 72,057 \$ ile en düşük noktaya ulaşır, bu da daha uzun çalışma sürelerinin daha uygun maliyetli çözümler sağladığını gösterir. Çevrim Süresi (CT) de benzer bir eğilim göstermekte, en kısa çalışma süresinde 125 saniyeden 500'de yaklaşık 100 saniyeye düşmekte, çalışma süreleri sırasıyla 1250 ve 1500'e uzadıkça kademeli olarak 178,57 ve 214,28 saniyeye yükselmektedir. İlginç bir şekilde, CPU süreleri önemli ölçüde dalgalanmakta, 250'de 136,81 saniyeden 500'de 374,75 saniyeye keskin bir şekilde yükselmekte, ardından 750'de 231,83 saniyeye düşmekte ve 1500'de 225,41 saniyeye düşmeden önce 1250'de 809,85 saniye ile zirve yapmaktadır.

Çizelge 4.8. Çalışma Süresi Analizi İçin Optimum Sonuçlar

	250	500	750	1250	1500
Obj (\$)	96.34	79.65	72.057	72.057	72.057
CT (sec)	125	100	107.14	178.571	214.28
P	2	5	7	7	7
Inv	0	0	1	1	1
CPU(sec)	136.81	374.75	231.83	809.85	225.41



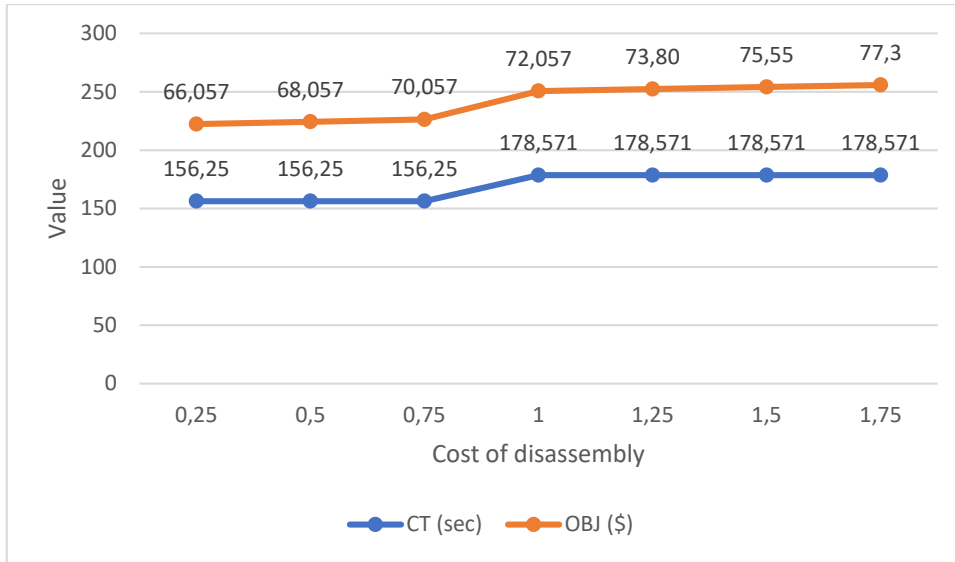
Şekil 4.7. Çalışma Süresi Analizi İçin Optimum Sonuçlar Grafiği

4.3.3. Maliyet Analizi

Bu bölümde, demontaj maliyetinin ve kârın çözüm üzerindeki etkisi analiz edilmektedir. Çizelge 4.9, değişen sabit demontaj maliyeti seviyelerinde demontaj maliyeti analizi için optimum sonuçları sunmaktadır. Sabit maliyet 0,25\$'dan 0,75\$'a yükseldikçe, üretim sayısı (P) 8'de sabit kalmakta, Çevrim Süresi (CT) 156,25 saniyede sabitlenmekte ve envanter seviyesi 4 birimde kalmaktadır; bu da bu maliyet aralığında, artan sabit demontaj maliyetlerine rağmen hem üretim hem de envanter politikalarının değişmediğini göstermektedir. Bu arada, Amaç değeri (OBJ) doğrudan maliyet etkisini yansıtacak şekilde kademeli olarak 66,057 \$'dan 70,057 \$'a yükselmektedir. Sabit demontaj maliyeti 1,00 \$ olduğunda bir değişim meydana gelir: üretim parti sayısı 7'ye düşer, CT 178,57 saniyeye yükselir ve envanter seviyesi 1 birime düşer. Maliyet 1,25 \$'dan 1,75 \$'a yükselmeye devam ettikçe, Amaç değeri 73,80 \$'dan 77,30 \$'a istikrarlı bir şekilde artarken, üretim parti miktarı ve envanter seviyesi değişmeden kalır. Özellikle, CPU süreleri maliyet seviyeleri arasında dalgalanmakta, en düşük maliyet seviyesinde 104,63 saniye ile maliyet 1,75 dolar olduğunda 1.858,72 saniye ile keskin bir şekilde zirve yaparak daha yüksek sabit demontaj maliyeti senaryoları için gereken artan hesaplama çabasını göstermektedir. Bu sonuçlar sabit demontaj maliyeti, operasyonel kararlar ve hesaplama performansı arasındaki önemli etkileşimi vurgulamaktadır.

Çizelge 4.9. Demontaj Maliyet Analizi İçin Optimum Sonuçlar

Bir Ürünü Demonte Etme Sabit Maliyeti	P (unit)	CT (sec)	OBJ (\$)	Inv (unit)	CPU
0.25	8	156.25	66.057	4	104.63
0.5	8	156.25	68.057	4	308.75
0.75	8	156.25	70.057	4	148.58
1	7	178.571	72.057	1	402.95
1.25	7	178.571	73.80	1	597.79
1.5	7	178.571	75.55	1	448.46
1.75	7	178.571	77.3	1	1858.72

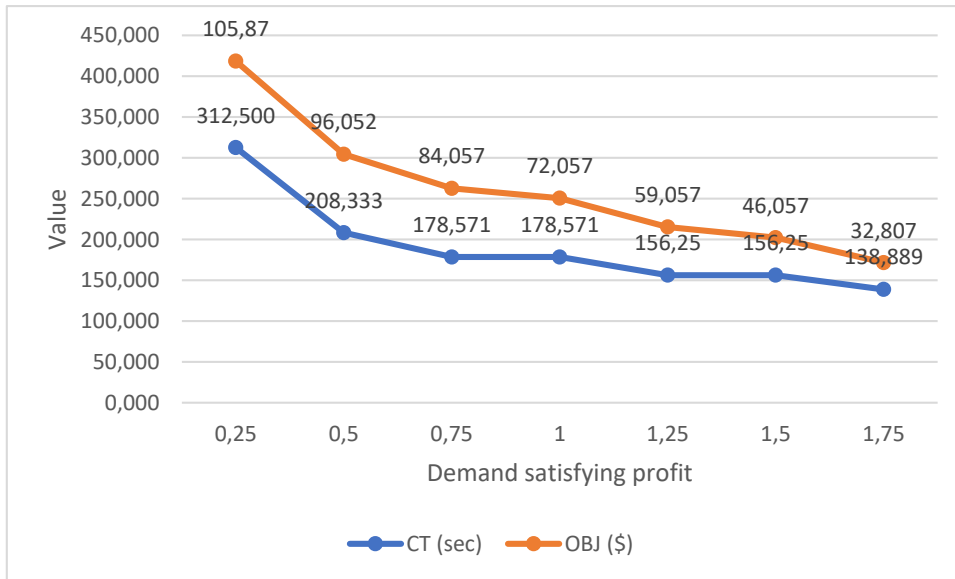


Şekil 4.8. Demontaj Maliyet Analizi İçin Optimum Sonuçlar Grafiği

Çizelge 4.10. Kâr Analizi İçin Optimum Sonuçlar

Tatmin Edici Kar Talebi	P (unit)	CT (sec)	OBJ (\$)	Inv (unit)	CPU
0.25	4*	312.500*	105.87*	0*	TL
0.5	6	208.333	96.052	0	4120.68
0.75	7	178.571	84.057	1	447.09
1	7	178.571	72.057	1	402.95
1.25	8	156.25	59.057	4	635.70
1.5	8	156.25	46.057	4	648.58
1.75	9	138.889	32.807	7	466.01

TL= zaman sınırına ulaşıldı *=tamsayı çözümü



Şekil 4.9. Kâr Analizi İçin Optimum Sonuçlar Grafiği

Çizelge 4.10, talebin karşılanmasından elde edilen değişen kar seviyelerinin model sonuçları üzerindeki etkilerini özetlemektedir. Kar 0,25'ten 1,75'e yükseldikçe, üretim sayısı 4'ten 9'a yükselirken, çevrim süresi 312,5 saniyeden 138,89 saniyeye düşerek üretim verimliliğinin arttığını göstermektedir. Amaç değeri önemli ölçüde düşerek (105,87 dolardan 32,807 dolara) daha yüksek kar marjlarında daha iyi maliyet etkinliği göstermektedir. CPU süresi dalgalanma gösterse de kârdaki 0,5'lik kayda değer artış, düşük kâr seviyelerinde daha fazla karmaşıklığa işaret etmektedir. Genel olarak, taleple ilgili daha yüksek kâr, daha verimli ve envanter odaklı çözümlere olanak sağlamaktadır.

4.4. Sonuçlar, Tartışma Ve Öneriler

Bu çalışmada, elektronik atıkların yönetiminde sürdürülebilirlik ilkesinin giderek artan önemi dikkate alınarak, bulanık talep altında bütünleşik toplama, demontaj ve dağıtım problemi ele alınmıştır. Geri kazanım süreçlerinin optimizasyonunu hedefleyen bu çalışma, elektronik atıkların etkin şekilde toplanması, parçalarına ayrılması ve yeniden dağıtılması süreçlerini entegre biçimde ele almaktadır. Bu doğrultuda, iki farklı model önerilmiş ve ilgili matematiksel formülasyonlar sunulmuştur.

Birinci model kapsamında, demontaj işlemi sonucunda elde edilen bileşenlerin yalnızca birine talep olduğu varsayılmış; bu senaryo karma tamsayılı doğrusal programlama yaklaşımıyla modellenmiştir. Öte yandan, ikinci modelde demontaj işlemi neticesinde ortaya çıkan tüm bileşenlere talep olduğu kabul edilmiş ve bu durum karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli ile ifade edilmiştir.

Her iki model için örnek problem setleri üzerinde hesaplamalı deneyler gerçekleştirilmiş, daha sonra rassal olarak üretilen veri kümeleri ile modellerin performans sınırları test edilmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, belirsizlik içeren tersine tedarik zincirlerinde karar vericilere esneklik sağlayacak gerçekçi ve uygulanabilir bir karar destek sistemi sunulmuştur.

Çalışmada ayrıca, sabit demontaj maliyetinin sistem çıktıları üzerindeki etkisi detaylı şekilde analiz edilmiştir. Yapılan senaryo analizlerine göre, sabit maliyet 0,25 ile 0,75 birim aralığında iken üretim miktarı, çevrim süresi ve envanter seviyesi sabit kalmakta; yalnızca amaç fonksiyonu değeri artış göstermektedir. Ancak sabit maliyet 1,00 birim seviyesine ulaştığında, sistem davranışında belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir: üretim miktarı azalmakta, çevrim süresi artmakta ve envanter seviyesi düşmektedir. 1,25

ile 1,75 birim aralığında ise sadece toplam maliyetin arttığı, diğer operasyonel kararların sabit kaldığı tespit edilmiştir.

Bununla birlikte, işlemci çözüm süresinin, sabit demontaj maliyetindeki artışla birlikte ciddi şekilde yükseldiği görülmüş; bu durum, yüksek maliyetli senaryolarda daha yoğun hesaplama çabası gerektiğini ortaya koymuştur. Tüm bu bulgular, sabit demontaj maliyetinin yalnızca maliyet üzerinde değil, aynı zamanda operasyonel kararlar ve hesaplama performansı üzerinde de doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, elektronik atıkların sürdürülebilir yönetimi kapsamında, bulanık talep altında etkili planlama yapılabilmesi için hem çevresel hem de ekonomik açılardan değerli yönetsel içgörüler sunmakta; aynı zamanda, döngüsel ekonomi yaklaşımlarıyla uyumlu bir modelleme çerçevesi önermektedir. Gelecek araştırmalarda, modele ilave belirsizlik kaynaklarının dâhil edilmesi veya farklı ürün kategorilerine uygulanarak genelleştirilebilirliğinin test edilmesi önerilmektedir.

5. GERÇEK UYGULAMALAR VE ETKİLERİ

Bu bölümde tez kapsamındaki problem ile ilgili ülkemizden ve yurtdışından başarılı örnekler yakından incelenecektir. Kullanım ömrünü tamamlamış elektronik ürünlerin demontajı ve değerli bileşenlerin geri kazanılması; çevresel etkilerin azaltılması ve döngüsel ekonomi ilkelerinin uygulanması açısından stratejik bir öneme sahiptir. Apple, LG, Samsung gibi global teknoloji liderleri, yenilikçi demontaj teknolojileri ve geri dönüşüm programlarıyla bu alanda öncülük ederken, Türkiye’de de Arçelik, Anel Doğa, Exitcom ve Katkisan gibi firmalar, AEEE (Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman) yönetiminde önemli adımlar atmaktadır. Ancak, Türkiye’de geri dönüşüm oranlarının dünya ortalamasının altında olması, bu alanda daha fazla çalışma yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu tez çalışması, ömrünü tamamlamış elektronik ürünlerin toplama, demontaj ve dağıtım süreçlerini global ve yerel uygulamaları kapsayacak şekilde inceleyerek, sürdürülebilir bir geri dönüşüm ekosistemi için yenilikçi yaklaşımlar sunmayı amaçlamaktadır.

Teknoloji ve inovasyon konusunda dünya çapında lider markalardan biri olan Apple, ürettiği ürünlerindeki malzemelerin yaklaşık yüzde 20'sini geri dönüştürülmüş ve yenilenebilir kaynaklardan temin ettiğini belirtmektedir. Hedeflerinin %100 'e ulaşmak ve madenciliğe olan bağımlılığı tamamen bitirmek olduğunu belirten şirket, 2025 yılına kadar ana bileşenlerde %100 geri dönüştürülmüş kobalt, kalay, altın ve nadir toprak elementlerini kullanmaya yönelik çalışmalar sürdürüldüğünü belirtmektedir. Şirketin demontaj işlemini çok fonksiyonlu yetenekleriyle demontaj robotları Daisy, Dave ve Taz yapmaktadır. Robotlar, geri dönüştürülmüş aygıtlardaki altın, kobalt, tungsten gibi önemli materyalleri ve nadir bulunan toprak elementlerini çok seri bir şekilde geri dönüştürebilmektedir. Apple, geliştirdiği robot ile geleneksel geri dönüşümcülerin sağlayamadığı değerli malzemeleri, hasarsız bir şekilde tekrar kazanmayı başarmaktadır. 20'den fazla bağımsız kol ile donatılmış bu endüstriyel robot, dakikada ortalama 3.3 iPhone'u demonte hale getirip, tüm bileşenlerini sınıflandırarak ayırabilmektedir. Yılda 1,2 milyon adede kadar telefonu bileşenlerine ayırabilen Daisy, Apple'ın daha fazla değerli malzemeyi geri dönüştürebilmesini sağlamaktadır. (Daisy gibi robotları kullanmadan önce, insan gücü ile bir iPhone'u parçalara ayırıp demonte edebilmek için demontaj işçileri tarafından 7 dakika harcandığı belirtilmektedir.) Apple yetkilileri, araştırmacılara ve demontaj süreçleri geliştiren diğer elektronik üreticilerine Daisy ile ilgili tüm patentlerin lisansını sunmaktadır. Demontaj aşamasında büyük inovasyon

geliştiren şirket, MÖS elektronik ürünleri toplama ve dağıtım konusunda da öncülük etmektedir. MÖS durumundaki Apple marka tüm aygıtlar, istenilen Apple Store'dan veya online olarak şirketin toplama merkezine geri dönüşüm için ücretsiz olarak yollanabilmektedir (“Çevresel İlerleme Raporu”, 2023). MacBook Air yüzde 50'den fazla geri dönüştürülmüş malzemeye üretilen ilk ürün olma özelliğine sahiptir. iPhone 15 serisi, Apple Watch Series 9 ve Apple Watch Ultra 2'nin pillerinde yüzde 100 geri dönüştürülmüş kobalt kullanılmaktadır. Ürünlerindeki, tungstenin yüzde 99'undan fazlası geri dönüştürülmüş kaynaklardan gelmektedir (“Environmental Progress Report”, 2024).

ERI, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki en büyük tam entegre elektronik varlık imha sağlayıcısı ve siber güvenlik odaklı donanım imha şirkettir. ABD'deki geri dönüştürülen tüm elektronik atıkların ortalama %5'ini ERI şirketi tarafından geri dönüştürülmektedir. ERI, ABD'deki 9 tesisinin tamamını NAID ve e-Stewards tarafından sertifikalandıran tek sağlayıcı olarak hem veri imhası hem de geri dönüşüm için en yüksek düzeyde sertifikalara sahiptir. Yıllık bir milyar pounda kadar atık elektronik ürün parçalama ve dönüştürme kapasitesine sahip olan şirket, müşterilerin tercih ettiği noktalara kamyon treyler yerleştirmektedir. Müşteriler tarafından uygun şekilde paketlenmiş atık elektronik cihazlar treylere yüklenir. Römork dolduğunda ERI, elektronik parçaların geri dönüşümü için toplanmasını sağlamak üzere dolu römorku sahadan çıkartır ve boş bir römorkla değiştirir. Böylelikle MÖS elektronik ürünler toplanarak fabrikalara getirilmiş olur. Kullanıcılar atık elektronik cihazlarını, Amerika Birleşik Devletleri genelinde ücretsiz kargo ile yollayarak geri dönüşüm programına dahil olabilmektedir (“Electronics Recycling (E-Waste Recycling)”, t.y.).

LG Elektronik grubu, ERI geri dönüşüm şirketi desteğiyle 2023 yılında 26 ton elektronik atığı bırakma noktalarına teslim ederek elektronik atık geri dönüşüme katkı sağlamıştır. LG Elektronik, elektronik atıkların değerlendirildiği bir geri dönüşüm süreci tesis ederek ömrünü tamamlamış MÖS elektronik ürünlerin toplanması, demontajı ve ayrıştırılan bileşenlerin dağıtımı konusunda liderlik eden firmalar arasında yerini almaktadır. 2006 yılından 31 Aralık 2023 tarihine kadar 3,99 milyon ton elektronik atık geri dönüşümü sağlayarak %94,5 geri dönüşüm oranına ulaşmıştır. Atık durumdaki buzdolapları, çamaşır makineleri, klimalar ve diğer elektronik ürünler LG bayileri ve ücretsiz gönderim yoluyla tek bir merkezde toplamaktadır. Toplanan elektronik atıklar bileşenlerine söktükten sonra tekdüze boyutlara bölünene kadar parçalanmaktadır. Parçalanmış ve demonte edilmiş elektronik atıklardan geri dönüştürülebilecek hammaddeler seçilmektedir. İlk sırada mıknatıslara yapışan çelik gelmekte ardından

alüminyum, bakır ve plastik sıralanmaktadır. Atık plastik, ek bir işlemle geri dönüştürülmüş plastiğin hammaddesi olan reçine peletlerine dönüştürülmektedir. Geri dönüştürülen materyaller, reçine topakları ve diğer değerli bileşenler, LG Elektronik'in yeni ürünlerinin üretiminde kullanılmaktadır ("We've made it easy to recycle your electronics", 2024).

Samsung Elektronik Geri Dönüşüm Programı ile müşterilerin Samsung markası dahil ve bu marka ile kısıtlı olmamak üzere MÖS durumundaki tüm tablet, telefon ve benzeri elektronik ürünleri ve aksesuarları, Samsung Yetkili Servis Merkezlerinde bulunan cihaz toplama kutuları aracılığıyla toplamaktadır. Geri Dönüşüm Programı'na katılan müşteriler, programa dahil edilen her bir cihaz için ayrı ayrı olacak şekilde, shop.samsung.com/tr üzerinden yapacağı tüm alışverişlerde kullanmak üzere indirim kuponu kazanmaktadır ("Samsung Geri Dönüşüm Programı'yla daha yeşil bir Dünya için harekete geçin!", t.y.). Samsung, Geri Dönüşüm Programı için gönderilen cihazların gerekli tüm ulusal standartlara uygun olarak işlenmesi (bertaraf, geri kazanım veya geri dönüşümünün yapılması) için 3. Parti şirketlerden hizmet almaktadır. Samsung Elektronik tarafından Kore'de kurulan Asan Geri Dönüşüm Merkezi liderliğinde temel kaynaklar için geri dönüşüm operasyonları gerçekleştirilmektedir. Merkezde, atık elektronik ürünler, buzdolapları, çamaşır makineleri ve klimalardan elde edilen büyük metaller (demir, bakır, alüminyum vb.), elektronik bileşenler ve plastik geri dönüştürülmek üzere ayrıştırılmaktadır. Ayrıca Samsung Elektronik, kullanım ömrünü tamamlayan cep telefonlarını geri almak için de çeşitli kampanyalar düzenlemektedir. Toplanan cep telefonları, ana gövde ve pil olarak ayrılarak temel kaynaklar çıkarılmakta ve geri dönüştürülmektedir. Özellikle lityum ve kobalt gibi nadir metaller içeren piller, temel metal kaynaklarının çıkarılması ve yeni pil kaynağı olarak kullanılması için geri dönüşüm şirketlerine gönderilmektedir ("Kaynak Döngüsellliği", t.y.). Samsung, 2009'dan 2022'ye kadar 50'den fazla ülkede yürürlükte olan atık ürün toplama sistemleri aracılığıyla dünya çapında 5,69 milyon ton elektronik atık toplamıştır. 2030 yılına kadar 10 milyon ton elektronik atık toplama planı ve 2050 yılına kadar 25 milyon ton atık toplama planlarıyla atık üretim toplama sistemlerini ürün sattığı 180'den fazla ülkeye genişletmeyi planlamaktadır ("Circular Economy", t.y.).

Ülkemizde ise atık elektrikli ve elektronik ürünlerin geri dönüşümü ve bertarafını sağlamak için faaliyet gösteren kuruluş sayısı dünyadaki emsallerine göre az sayıdadır. Bu nedenle elektrikli ve elektronik ürünlerin geri dönüşüm oranı da dünya ortalamasının altındadır. GESP (Global E-waste Statistics Partnership- Küresel E-Atık (Elektronik atık)

İstatistikleri İş birliği)'in 2019 yılında hazırladığı rapora göre, Çin 10 milyon metrik tondan fazla E-Atık üreterek dünyada birinci sırada yer almaktadır. Çin'i ortalama 7 milyon metrik ton ile ABD izlemektedir (Balde vd., 2024). Bu nedenle, Çin ve ABD E-Atık politikası uygulayan ülkeler arasında önemli iki örneği oluşturmaktadır. 2020 yılında dünya genelinde üretilen e-atık miktarı yaklaşık 53,6 milyon ton olarak kaydedilmiştir ve bu rakamın 2030 yılında 74 milyon ton gibi devasa bir seviyeye ulaşması beklenmektedir (Yıldırım, 2023). Ülkemizde geri dönüşüm hizmeti veren birçok kuruluş bulunmaktadır. Anel Doğa Entegre Geri Dönüşüm Endüstri A.Ş. öne çıkan firmalar arasında yer almaktadır. Anel Doğa, MÖS elektrikli ve elektronik cihaz, otomobil, uçak ve aksamaları, atık kablo, atık CRT (Katot Işınlı Tüp, monitör) geri dönüşümünün yanı sıra tehlikeli atık ara depolama, metal işleme, atık yönetim hizmeti, atık akümülatör geçici depolaması alanlarında faaliyet göstermektedir. 2003 yılında Türkiye'de ilk ve tek entegre elektronik atık geri dönüşüm tesisi olarak kurulmuş olup Türkiye genelinde 600'ün üzerinde kurum ve kuruluşa (Türk Telekom, Vodafone, Digitürk, Schneider Elektrik, Toyota, Ford, Hp vd.) "atık yönetimi" konusunda hizmet vermektedir. Anel Doğa tarafından elektrikli ve elektronik eşya üretim işletmelerine, atık biriktirme konteyneri bırakılmakta ve konteyner dolduğunda dolu konteyner alınarak boş konteynerle değiştirilmektedir. Bu hizmet MÖS elektronik ürünlerin toplama merkezlerine toplanmasına iyi bir örnektir. Artık kullanılmayan elektrikli ve elektronik atıkları, teknik olarak yüksek kalitede ve çevreyle dost bir süreçle yeniden işleyerek her çeşit malzeme bileşimini çıkartmakta ve hacimlerini küçültmektedir. Çıkarılan ikincil homojen maddeler, duyarlı bir kazanım süreciyle yeniden üretime dahil edilmektedir ("Elektronik Atıklar", t.y.).

Arçelik genişletilmiş üretici sorumluluğu kapsamında 2014'te Eskişehir'de ve Bolu'da AEEE geri dönüşüm tesislerini kurmuş ve 2014'ten bu yana yaklaşık 1,3 milyon AEEE geri dönüştürmüştür. Eskişehir'de buzdolaplarını, Bolu'da da diğer beyaz eşyaları ve küçük ev aletlerini geri dönüştürerek, ürünlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini en aza indirmektedir. Faaliyetleriyle bu alanda öncü olan Arçelik, aynı zamanda sektöründe bu tür bir tesisi inşa edip işleten tek şirket ünvanına sahiptir. Eskişehir'deki fabrika, Türkiye'de eski buzdolaplarında kullanılan, ozon tabakasını incelten kloroflorokarbon (CFC) gazlarının kapalı bir sistemde toplandığı ilk geri dönüşüm tesisidir. Geri dönüştürülmüş AEEE'lerden elde edilen plastik, demir, bakır, alüminyum gibi malzemeler, kaynak verimliliği politikasına uygun olarak Arçelik tarafından ekonomiye geri kazandırılmaktadır. Diğer kategorilerde toplanan AEEE'ler, çevre izinleri ve ruhsatları olan anlaşmalı geri dönüşüm tesislerine gönderilmektedir. Arçelik,

Corporate Knights’ın dünyanın en sürdürülebilir şirketlerini sıraladığı Global 100 List’e 4’üncü kez girme başarısını göstermiştir (“Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman (AEEE) Geri Dönüşümü”, t.y).

Exitcom, AEEE ve atık pillerin geri dönüşümü konusunda hizmet veren bir geri dönüşüm şirketidir. 2002 yılından bugüne yaptığı çalışma ve yatırımlarla alanındaki uzmanlığını ve öncü kimliğini pekiştiren Exitcom, 2003 yılında Türkiye’nin ilk E-Atık geri kazanım şirketi olarak başladığı faaliyetlerinde birçok büyük projede başarıyla yer almıştır. Şirket elektronik atıkların %98’i değerlendirilerek, yılda 126 bin ton elektronik atığı toplamakta ve geri dönüştürmektedir. Türkiye’de her yıl yaklaşık olarak 500 bin ton E-Atık ortaya çıktığı değerlendirildiğinde, şirketin ülkemizdeki elektronik atıkların yaklaşık olarak %25’ ini geri dönüştürdüğü görülmektedir (“E-Atık Geri Kazanım Tesisi, Exitcom Recycling”, t.y.).

Türkiye’de uzun yıllar E-Atık geri dönüşümü alanında faaliyet gösteren EAG Geri Dönüşüm; toplama, demontaj ve dağıtım hizmetlerinde ülkenin önde gelen firmaları arasındadır. EAG Geri Dönüşüm; atık akü geri dönüşümü, CRT monitör geri dönüşümü, elektronik atık geri dönüşümü, entegre atık yönetimi, floresan ve hurda kablo geri dönüşümü gibi alanlarda hizmet vermektedir. Ayrıca atık pil toplama, biriktirme noktaları oluşturulma gibi hizmetlerle de E-Atıkların toplanması hizmetini sağlamaktadır. Atık pillerin toplanması, taşınması, ayrıştırılması ve de depolanması hizmeti için TAP (Taşınabilir Pil Üreticileri Derneği) tarafından "Atık Pil Yetkili Toplayıcı" belgesi verilmiştir (“E-Atık Geri Dönüşümü”, t.y.).

Katkısan Geri Dönüşüm, elektronik atık yönetimi alanında öncü hizmetler sunan bir geri dönüşüm firmasıdır. Bilgisayarlar ve bileşenleri, telekomünikasyon cihazları, tüketici elektroniği, küçük ev aletleri ve elektronik büro ekipmanlarından çıkan e-atıkların geri dönüşümünü sağlayarak E-Atık geri dönüşümüne katkı sağlamaktadır. Katkısan Geri Dönüşüm, bilişim atıklarını profesyonel bir şekilde toplayarak ve yeniden kullanıma sunarak, sektörde çevresel duyarlılığı artırmayı ve atık yönetimi konusunda öncü bir rol üstlenmeyi hedefleyen firmanın, 2024 yılında işlediği elektronik atık miktarı 70 ton civarında olup 2025 yılı içerisinde ise nisan ayına kadar 40 ton civarında elektronik atığın işlenmesini sağlamışlardır (“Elektronik Atık”, t.y.).

6. KAYNAKÇA

- Agrawal, S., & 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. <https://doi.org/10.1080/00207540600943985>
- Altekin, F. T., & Akkan, C. (2012). Task-failure-driven rebalancing of disassembly lines. *International Journal of Production Research*, 50(18), 4955-4976. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.616915>
- Altekin, F. T., Kandiller, L., & Ozdemirel, N. E. (2008). Profit-oriented disassembly-line balancing. *International Journal of Production Research*, 46(10), 2675-2693. <https://doi.org/10.1080/00207540601137207>
- Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman (AEEE) Geri Dönüşümü (t.y.). Arcelikglobal.com. 27 Temmuz 2025 tarihinde <https://www.arcelikglobal.com/tr/surdurulebilirlik/intouch/areas/atik-elektrikli-ve-elektronik-ekipman-aeer-geri-donusumu/> adresinden edinilmiştir.
- Augerat, P., Naddef, D., Belenguer, J. M., Benavent, E., Corberan, A., & Rinaldi, G. (1995). Computational results with a branch and cut code for the capacitated vehicle routing problem. *ABD Enerji Bakanlığı Bilimsel ve Teknik Bilgi Ofisi*. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/289002>
- Balde, C. P., Kuehr, R., Yamamoto, T., McDonald, R., D'Angelo, E., Althaf, S., Bel, G., Deubzer, O., Fernandez-Cubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., di Cortemiglia, V. L., Lobuntsova, Y., Nnorom, I., Pralat, N., & Wagner, M. (2024). *The Global E Waste Monitor 2024*. https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/03/GEM_2024_18-03_web_page_per_page_web.pdf
- Bartholdi, J. J. (1993). Balancing two-sided assembly lines: A case study. *International Journal of Production Research*, 31(10), 2447-2461. <https://doi.org/10.1080/00207549308956868>
- Bedir, N., Alağaç, H. M., & Eren, T. (2017). Çok Ölçütlü Karar Verme İle Demontaj Hattı Dengeleme. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 9(1). https://www.researchgate.net/profile/Haci_Alakas/publication/321386472_A_Disassembly_Line_Balancing_with_Multicriteria_Decision_Making/links/5a259ba50f7e9b71dd09c93c/A-Disassembly-Line-Balancing-with-Multicriteria-Decision-Making.pdf
- Beltrami, E. J., & Bodin, L. D. (1974). Networks and vehicle routing for municipal waste collection. *Networks*, 4(1), 65-94. <https://doi.org/10.1002/net.3230040106>
- Bentaha, M. L., Battaia, O., & Dolgui, A. (2014). A sample average approximation method for disassembly line balancing problem under uncertainty. *Computers & Operations Research*, 51, 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.05.006>
- Bentaha, M. L., Battaia, O., & Dolgui, A. (2015). 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. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.961212>
- Campbell, A. M., & Wilson, J. H. (2014). Forty years of periodic vehicle routing. *Networks*, 63(1), 2-15. <https://doi.org/10.1002/net.21527>
- Circular Economy (t.y.). Samsung.com. 31 Temmuz 2025 tarihinde <https://www.samsung.com/global/sustainability/planet/circular-economy/> adresinden edinilmiştir.
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Lenny Koh, S. C., & Rosa, P. (2015). Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.010>
- Çevresel İlerleme Raporu (2023 Ekim). Apple.com 27 Temmuz 2025 tarihinde https://www.apple.com/tr/environment/pdf/Apple_Environmental_Progress_Report_2023.pdf adresinden edinilmiştir.
- Çil, Z. A., Öztop, H., Diri Kenger, Z., & Kizilay, D. (2023a). Integrating distributed disassembly line balancing and vehicle routing problem in supply chain: Integer programming, constraint programming, and heuristic algorithms. *International Journal of Production Economics*, 265, 109014. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.109014>
- Dantzig, G. B., Fulkerson, D. R., & Johnson, S. M. (1959). On a Linear-Programming, Combinatorial Approach to the Traveling-Salesman Problem. *Operations Research*, 7(1), 58-66.

- <https://doi.org/10.1287/opre.7.1.58>
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80-91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- Delage, E., & Ye, Y. (2010). Distributionally Robust Optimization Under Moment Uncertainty with Application to Data-Driven Problems. *Operations Research*, 58(3), 595-612. <https://doi.org/10.1287/opre.1090.0741>
- Demirel, N. Ö., & Gökçen, H. (2008). A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(11), 1197-1206. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1290-7>
- Deniz, N., & Özçelik, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.188>
- Diabat, A. (2014). Hybrid algorithm for a vendor managed inventory system in a two-echelon supply chain. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 114-121. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.061>
- Dias, P., Machado, A., Huda, N., & Bernardes, A. M. (2018). Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. *Journal of Cleaner Production*, 174, 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.219>
- Ding, L.-P., Feng, Y.-X., Tan, J.-R., & Gao, Y.-C. (2010). A new multi-objective ant colony algorithm for solving the disassembly line balancing problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(5), 761-771. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2303-5>
- Diri Kenger, Z., Koç, Ç., & Özceylan, E. (2020a). Integrated disassembly line balancing and routing problem. *International Journal of Production Research*, 58(23), 7250-7268. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1740346>
- Diri Kenger, Z., Koç, Ç., & Özceylan, E. (2020b). *Smart Factories: Integrated Disassembly Line Balancing and Routing Problem with 3D Printers*. Logistics 4.0. CRC Press, 12. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429327636-20/smart-factories-züla-dir-kenger-çağrı-koç-eren-özceylan>
- Diri Kenger, Z., Koç, Ç., & Özceylan, E. (2021a). Integrated Collection-Disassembly-Distribution Problem. *Sustainable Production and Logistics*, 16. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003005018-5-6/integrated-collection-disassembly-distribution-problem-züla-dir-kenger-çağrı-koç-eren-özceylan>
- Diri Kenger, Z., Koç, Ç., & Özceylan, E. (2021b). Integrated disassembly line balancing and routing problem with mobile additive manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 235, 108088. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108088>
- Durmaz, M., Günal, H., Budak, M., & Çelik, İ. (2024). Harran Ovası'nda Tarla Ölçeğinde Toprak Fiziksel Özelliklerinin Mekânsal Değişkenliği. *MAS Journal of Applied Sciences*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11632418>
- Durmaz, N., & Budak, A. (2025). An integrated Bi-objective green vehicle routing and partial disassembly line problem for electronic waste: An industrial case study. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 38(3), 408-433. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2335984>
- E-Atık Geri Kazanım Tesisi, Exitcom Recycling (t.y.). Genel Bakış. Exitcom.com. 31 Temmuz 2025 tarihinde <https://exitcom.com.tr/elektronik-atik-geri-donusumu/#> adresinden edinilmiştir.
- E-Atık Sürecimiz (t.y.). Eag.com. 31 Temmuz 2025 tarihinde <https://www.eag.com.tr/index.html> adresinden edinilmiştir.
- Electronics Recycling (E-Waste Recycling) (t.y.). Eridirect.com. 31 Temmuz 2025 tarihinde <https://eridirect.com/services/electronics-recycling-ewaste/> adresinden edinilmiştir.
- Elektronik Atık Geri Kazanım (AEEE) (t.y.). Burkasana.com. 27 Temmuz 2025 tarihinde <https://www.burkasana.com/tr/geri-kazanim-ve-geri-donusum-surecleri/elektronik-atik-geri-kazanimaeee/> adresinden edinilmiştir.
- Elektronik Atık (t.y.). Katkısana Geri Dönüşüm. Katkısana.com. 31 Temmuz 2025 tarihinde <https://katkisan.com/elektronik-atik/> adresinden edinilmiştir.
- Elektronik Atıklar (t.y.). Aneldoga.com. 27 Temmuz 2025 tarihinde http://aneldoga.com/pages/1585/1579/f/tr-TR/Elektronik_Atiklar.aspx adresinden edinilmiştir.
- Easwaran, G., & Üster, H. (2010). A closed-loop supply chain network design problem with integrated

- forward and reverse channel decisions. *IIE Transactions*, 42(11), 779-792. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2010.504689>
- Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472-1483. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.05.009>
- Elshaer, R., & Awad, H. (2020). A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106242. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106242>
- Environmental Progress Report* (2024). Apple.com. 31 Temmuz 2025 tarihinde https://www.apple.com/tr/environment/pdf/Apple_Environmental_Progress_Report_2024.pdf adresinden edinilmiştir.
- Fisher, M. (1995). Chapter 1 Vehicle routing. *Handbooks in Operations Research and Management Science* (C. 8, ss. 1-33). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(05\)80105-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(05)80105-7)
- Gungor, A., & Gupta, S. M. (2001). A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures. *International Journal of Production Research*, 39(7), 1427-1467. <https://doi.org/10.1080/00207540110052157>
- Gungor, A., Gupta, S. M., Pochampally, K., & Kamarthi, S. V. (2001). Complications in disassembly line balancing. *Environmentally Conscious Manufacturing*, 4193, 289-298. <https://doi.org/10.1117/12.417274>
- Gungor, A., & Gupta, S. M. (2002). Disassembly line in product recovery. *International Journal of Production Research*, 40(11), 2569-2589. <https://doi.org/10.1080/00207540210135622>
- Güler, E., Kalayci, C. B., Ali Ilgın, M., Özceylan, E., & Güngör, A. (2024). Advances in partial disassembly line balancing: A state-of-the-art review. *Computers & Industrial Engineering*, 188, 109898. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109898>
- Gülsün, B., Gülfem Tuzkaya, & Ender Bildik. (2008). Reverse Logistics Network Design: A Simulated Annealing Approach. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 26(1), 13. <http://ytusigmadergisi.com/scientific/2008-1-6-tam.pdf>
- Habibi, M. K. K., Battaia, O., Cung, V.-D., & Dolgui, A. (2014). Integrated Procurement–Disassembly Problem. B. Grabot, B. Vallespir, S. Gomes, A. Bouras, & D. Kiritsis (Ed.), *Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World* (ss. 482-490). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44736-9_59
- Habibi, M. K. K., Battaia, O., Cung, V.-D., & Dolgui, A. (2017a). An efficient two-phase iterative heuristic for Collection-Disassembly problem. *Computers & Industrial Engineering*, 110, 505-514. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.06.031>
- Habibi, M. K. K., Battaia, O., Cung, V.-D., & Dolgui, A. (2017b). Collection-disassembly problem in reverse supply chain. *International Journal of Production Economics*, 183, 334-344. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.025>
- Habibi, Muh. K. K., Battaia, O., Cung, V.-D., Dolgui, A., & Tiwari, M. K. (2019). Sample average approximation for multi-vehicle collection–disassembly problem under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 57(8), 2409-2428. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1519262>
- He, J., Chu, F., Dolgui, A., & Anjos, M. F. (2024). Multi-objective disassembly line balancing and related supply chain management problems under uncertainty: Review and future trends. *International Journal of Production Economics*, 272, 109257. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109257>
- Hezer, S., & Kara, Y. (2015). A network-based shortest route model for parallel disassembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 53(6), 1849-1865. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.965348>
- Hu, P., Chu, F., Dolgui, A., Chu, C., & Liu, M. (2024). Integrated multi-product reverse supply chain design and disassembly line balancing under uncertainty. *Omega*, 126, 103062. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103062>
- Ilgın, M. A. (2011). The disassembly line: Balancing and modeling, by S.M. McGovern and S.M. Gupta. *Production Planning & Control*, 22(7), 723-724. <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.584780>
- Ilgın, M. A., Akçay, H., & Araz, C. (2017). Disassembly line balancing using linear physical programming. *International Journal of Production Research*, 55(20), 6108-6119. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1324225>

- Ilgin, M. A., & Gupta, S. M. (2010a). Comparison of economic benefits of sensor embedded products and conventional products in a multi-product disassembly line. *Computers & Industrial Engineering*, 59(4), 748-763. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.07.031>
- Ilgin, M. A., & Gupta, S. M. (2010b). Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *Journal of Environmental Management*, 91(3), 563-591. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.09.037>
- Ivanov, D., Pavlov, A., Pavlov, D., & Sokolov, B. (2017). Minimization of disruption-related return flows in the supply chain. *International Journal of Production Economics*, 183, 503-513. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.03.012>
- Jayaraman, V., Guide Jr, V. D. R., & Srivastava, R. (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, 50(5), 497-508. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600716>
- Jimenez, A., Crespo, A., Migoya, E., & Garcia, J. (2007). Advances in large-eddy simulation of a wind turbine wake. *Journal of Physics: Conference Series*, 75(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/75/1/012041>
- Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Rodri'guez, M. V. (2007). Linear programming with fuzzy parameters: An interactive method resolution. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1599-1609. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.10.002>
- Kalayci, C. B., & Gupta, S. M. (2013). Ant colony optimization for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24(3), 413-427. <https://doi.org/10.1108/17410381311318909>
- Kalayci, C. B., & Gupta, S. M. (2014). A tabu search algorithm for balancing a sequence-dependent disassembly line. *Production Planning & Control*, 25(2), 149-160. <https://doi.org/10.1080/09537287.2013.782949>
- Kannan, D., Garg, K., Jha, P. C., & Diabat, A. (2017). Integrating disassembly line balancing in the planning of a reverse logistics network from the perspective of a third party provider. *Annals of Operations Research*, 253(1), 353-376. <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2272-7>
- Kazemi, N., Modak, N. M., & Govindan, K. (2019). A review of reverse logistics and closed loop supply chain management studies published in IJPR: A bibliometric and content analysis. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 4937-4960. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1471244>
- Ketzenberg, M. E., Souza, G. C., & Guide, V. D. R. (2003). Mixed Assembly And Disassembly Operations For Remanufacturing. *Production and Operations Management*, 12(3), 320-335. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2003.tb00206.x>
- Kısa Toğrul, E. (2024). Yeşil iki aşamalı araç rotalama problemi: gerçek yol eğimini dikkate alan yakıt tüketimi hesaplaması. *Journal of Turkish Operations Management*, 8(1), 215-240. <https://doi.org/10.56554/jtom.1302872>
- Koç, A., Sabuncuoglu, I., & Erel, E. (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. <https://doi.org/10.1080/07408170802510390>
- Koç, Ç., & Laporte, G. (2018). Vehicle routing with backhauls: Review and research perspectives. *Computers & Operations Research*, 91, 79-91. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.11.003>
- Konstantakopoulos, G. D., Gayialis, S. P., & Kechagias, E. P. (2022). Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: A literature review and classification. *Operational Research*, 22(3), 2033-2062. <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00600-7>
- Laili, Y., Li, Y., Fang, Y., Pham, D. T., & Zhang, L. (2020). Model review and algorithm comparison on multi-objective disassembly line balancing. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 484-500. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.015>
- Li, H., Liu, Y., Jian, X., & Lu, Y. (2018). The two-echelon distribution system considering the real-time transshipment capacity varying. *Transportation Research Part B: Methodological*, 110, 239-260. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.02.015>
- Liu, X., Chu, F., Dolgui, A., Zheng, F., & Liu, M. (2021). Service-oriented bi-objective robust collection-disassembly problem with equipment selection. *International Journal of Production Research*, 59(6), 1676-1690. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1723815>
- McGovern, S. M., & Gupta, S. M. (2007). A balancing method and genetic algorithm for disassembly line

- balancing. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 692-708. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.055>
- Mete, S., Çil, Z. A., Ağpak, K., Özceylan, E., & Dolgui, A. (2016). A solution approach based on beam search algorithm for disassembly line balancing problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 41, 188-200. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.09.002>
- Mete, S., Çil, Z. A., Celik, E., & Ozceylan, E. (2019). Supply-driven rebalancing of disassembly lines: A novel mathematical model approach. *Journal of Cleaner Production*, 213, 1157-1164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.265>
- Özceylan, E., Kalayci, C. B., Güngör, A., & Gupta, S. M. (2019). Disassembly line balancing problem: A review of the state of the art and future directions. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 4805-4827. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1428775>
- Özceylan, E., & Paksoy, T. (2013). Reverse supply chain optimisation with disassembly line balancing. *International Journal of Production Research*, 51(20), 5985-6001. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.784405>
- Özceylan, E., & Paksoy, T. (2014). Fuzzy mathematical programming approaches for reverse supply chain optimization with disassembly line balancing problem. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 26(4), 1969-1985. <https://doi.org/10.3233/IFS-130875>
- Özceylan, E., Paksoy, T., & Bektaş, T. (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. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.11.001>
- Paksoy, T., Güngör, A., Özceylan, E., & Hancilar, A. (2013). Mixed model disassembly line balancing problem with fuzzy goals. *International Journal of Production Research*, 51(20), 6082-6096. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.795251>
- Panasonic Eko Teknoloji Merkezi (PETEC) (2025, 31 Mart). Panasonic.net. 31 Temmuz 2025 tarihinde https://panasonic.net/eco/petec/images/PETEC_by_numbers.jpg adresinden edinilmiştir.
- Rao, W., Liu, F., & Wang, S. (2016). An Efficient Two-Objective Hybrid Local Search Algorithm for Solving the Fuel Consumption Vehicle Routing Problem. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2016(1), 3713918. <https://doi.org/10.1155/2016/3713918>
- Recycling Processes (31 Mart 2025). Panasonic Eko Teknoloji Merkezi (PETEC). Panasonic.net. 31 Temmuz 2025 tarihinde <https://panasonic.net/eco/petec/process/> adresinden edinilmiştir.
- Riggs, R. J., Battaia, O., & Hu, S. J. (2015). Disassembly line balancing under high variety of end of life states using a joint precedence graph approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 638-648. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.11.002>
- Rujanavech, C., Lessard, J., Chandler, S., Shannon, S., Dahmus, J., & Guzzo, R. (2016). *Liam—An Innovation Story*. Apple. 31 Temmuz 2025 tarihinde https://www.apple.com.cn/environment/pdf/Liam_white_paper_Sept2016.pdf adresinden edinilmiştir.
- Samsung Geri Dönüşüm Programı'yla daha yeşil bir Dünya için harekete geçin! (t.y.). Samsung.com. 31 Temmuz 2025 tarihinde <https://www.samsung.com/tr/support/Recycling-Program/> adresinden edinilmiştir.
- Somtürk, H., & Toksarı, M. D. (2023). Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altında demontaj hattı problemi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*. 14 (4), 683-695. <https://doi.org/10.24012/dumf.1366117>
- Soysal, M., Çimen, M., & Demir, E. (2018). On the mathematical modeling of green one-to-one pickup and delivery problem with road segmentation. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1664-1678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.040>
- Stevenson, E. L., Toussaint, C. A., & Edwards, M. A. (2005). A review of reverse logistics and Depot Level Repairable tracking in the United States Navy. *Calhoun Institution Archive Of The Naval School*. 2005-06. <https://core.ac.uk/download/pdf/36703536.pdf>
- Sunay, G. (2016). Türkiye'de tehlikeli atık yönetiminin sorunlarının Türkiye'ye sosyal ve finansal maliyetinin tespit edilmesi. *Ulusal Tez Merkezi*, s.81 (Tez No: 435353) https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=pp0om83g_1SanKuJrpKG-w&no=nqE9s8Rr3MKjWPvw_MlfdQ
- Şahin, H. H., & Taşer, A. (2023). Elektronik atıkların tersine lojistik sürecinde swot analizi ile değerlendirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 88-100.

- <https://doi.org/10.33905/bseusbed.1320160>
- Tang, Y., Zhou, M., Zussman, E., & Caudill, R. (2002). Disassembly modeling, planning, and application. *Journal of Manufacturing Systems*, 21(3), 200-217. [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(02\)80162-5](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(02)80162-5)
- Tasoglu, G., & Ilgin, M. A. (2024). A simulation-based genetic algorithm approach for the simultaneous consideration of reverse logistics network design and disassembly line balancing with sequencing. *Computers & Industrial Engineering*, 187, 109794. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109794>
- Tersine Lojistik Ne Anlama Gelmektedir? (t.y.). Esalco.com. 31 Temmuz 2025 tarihinde <https://www.esalco.com/tersine-lojistik-ne-anlama-gelmektedir/> adresinden edinilmiştir.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). An Overview of Vehicle Routing Problems. *The Vehicle Routing Problem* (ss. 1-26). Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9780898718515.ch1>
- Toth, P., & Vigo, D. (2014). *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, Second Edition*. Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9781611973594.fm>
- Tuncel, E., Zeid, A., & Kamarthi, S. (2014). Solving large scale disassembly line balancing problem with uncertainty using reinforcement learning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(4), 647-659. <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0711-0>
- Vidal, T., Laporte, G., & Matl, P. (2020). A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants. *European Journal of Operational Research*, 286(2), 401-416. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.010>
- Wang, H.-F., & Hsu, H.-W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. *Computers & Operations Research*, 37(2), 376-389. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.06.001>
- We've made it easy to recycle your electronics (2024). LG Recycling Program. lgrecyclingprogram.com. 31 Temmuz 2025 tarihinde <https://lgrecyclingprogram.com/> adresinden edinilmiştir.
- Yılmaz, H., & Ergin, M. (2023). *Bulanık Mantık Kavramına Genel Bir Bakış*. Takvim-i Vekayi. 11(1), 94-129. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3001236>
- Yıldız Çankaya, S. (2022). Kapalı Döngü Tedarik Zinciri Uygulamalarını Etkileyen Faktörlerin Yorumlayıcı Yapısal Modelleme Ve Mıcmac Yöntemleri İle Analizi. *Yönetim Bilimleri Dergisi, Özel Sayı*, (1)-25. <https://doi.org/10.35408/comuybd.1146472>
- Yolmeh, A., & Saif, U. (2021). Closed-loop supply chain network design integrated with assembly and disassembly line balancing under uncertainty: An enhanced decomposition approach. *International Journal of Production Research*, 59(9), 2690-2707. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1736723>
- Zhang, X., Zhang, M., Zhang, H., Jiang, Z., Liu, C., & Cai, W. (2020). A review on energy, environment and economic assessment in remanufacturing based on life cycle assessment method. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120160. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120160>
- Zimmermann, M. (2001). Pathobiology of neuropathic pain. *European Journal of Pharmacology*, 429(1), 23-37. [https://doi.org/10.1016/S0014-2999\(01\)01303-6](https://doi.org/10.1016/S0014-2999(01)01303-6)

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yusuf BAYHAN
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti

EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
Üniversite	: Milli Savunma Üniversitesi / Kara Harp Okulu Komutanlığı	2012
Yüksek Lisans	: Hasan Kalyoncu Üniversitesi	2025
Doktora	: -	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2012-2019	Jandarma Genel Komutanlığı	Tim ve Bölük Komutanlığı Görevleri

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

BAYHAN Yusuf, “Bulanık Talep Altında Bütünleşik Toplama-Demontaj-Dağıtım Problemi”, Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği (YA/EM) 42. Ulusal Kongresi, 1-3 Kasım 2023, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep 2023, s.150