KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DEMONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜNDE OPTİMİZASYON TEMELLİ YAKLAŞIMLAR İÇİN BÜTÜNSEL BİR YÖNTEMBİLİM SUNULMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif ÖKSÜZ

MAYIS 2023
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DEMONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜNDE OPTİMİZASYON TEMELLİ YAKLAŞIMLAR İÇİN BÜTÜNSEL BİR YÖNTEMBİLİM SUNULMASI

ELİF ÖKSÜZ

ORCID : 0009 - 0002 - 8743 - 2676

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"ENDÜSTRİ YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 / 05 /2023
Tezin Savunma Tarihi : 29 / 05 /2023

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ömer Faruk YILMAZ
ORCID : 0000 - 0002 - 6202 - 4011

Trabzon 2023

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DEMONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜNDE OPTİMİZASYON TEMELLİ YAKLAŞIMLAR İÇİN BÜTÜNSEL BİR YÖNTEMBİLİM SUNULMASI

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 11 / 05 / 2023 gün ve 2003 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Ömer Faruk YILMAZ …...……...……

Üye : Doç. Dr. Gökhan ÖZÇELİK …...……...……

Üye : Doç. Dr. Ersin NAMLI ……...……...……

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Sürekli artan üretim ve tüketimle birlikte ürün yaşam döngüsü hızla azalmaktadır. Birçok ürün yaşam döngüsünü tamamlamadan atıl hale gelebilmekte ve böylece boş yere harcanan kaynaklar önemli ölçüde artmaktadır. Artan bu kaynak kullanımı geleceğimiz için bir sorun teşkil etmektedir. Bu yüzden geri dönüşümün yaşamımızın vazgeçilmez bir parçası olması gerekmektedir.

Elektronik atık ürünlerin geri dönüşümü için önemli olan demontaj faaliyetlerini en iyi şekilde yönetmek amacıyla çok amaçlı demontaj hat dengeleme ve çözüm yaklaşımları problemleri ele alınmalıdır. Bu çalışma kapsamında demontaj hattı dengeleme problemine ek olarak tersine tedarik zinciri tasarımı da ele alınmaktadır.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 9775

Tez çalışmasının tüm süreçlerinde sabırla yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Ömer Faruk YILMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca bana destek olan tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma süresince yardımlarını ve manevi desteğini esirgemeyen başta eşim ve biricik oğlum olmak üzere tüm arkadaşlarıma ve aileme teşekkür ederim.

Elif ÖKSÜZ

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘Demontaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Çözümünde Optimizasyon Temelli Yaklaşımlar için Bütünsel Bir Yöntembilim Sunulması’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Ömer Faruk Yılmaz’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 05/05/2023

Elif ÖKSÜZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET VI
SUMMARY VII
ŞEKİLLER DİZİNİ VIII
TABLOLAR DİZİNİ IX
SEMBOLLER DİZİNİ X
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5
3. PROBLEMİN TANIMI VE OPTİMİZASYON MODELİ 10
3.1. Problemin Tanımı 10
3.2. Optimizasyon Modeli 11
4. UYGULAMA 18
4.1. Deneysel Veriler 18
4.2. Deney Tasarımı 23
4.3. Merkezi Strateji Sonuçları 24
4.4. Merkezi Olmayan Strateji Sonuçları 26
4.5. Varyans Analizi 29
4.6. Karşılaştırmalı Analiz 31
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 34
6. KAYNAKLAR 36
ÖZGEÇMİŞ 38

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

DEMONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜNDE OPTİMİZASYON TEMELLİ YAKLAŞIMLAR İÇİN BÜTÜNSEL BİR YÖNTEMBİLİM SUNULMASI

Elif ÖKSÜZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ömer Faruk YILMAZ
2023, 47 Sayfa

Tersine tedarik zinciri, kullanılmış veya atık ürünlerin geri toplanması, işlenmesi ve yeniden değerlendirilmesi süreçlerini içerirken, demontaj hattı dengeleme probleminde ise bu süreçlerin daha verimli ve uyumlu hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Optimize edilmiş bir demontaj hattı, tersine tedarik zinciri süreçlerinin daha düşük maliyetlerle yürütülmesine, atık miktarının azaltılmasına ve kaynakların daha verimli kullanılmasına katkıda bulunur. Bu tez çalışması, sürdürülebilir üretim ve tüketim süreçlerinin önemini vurgulamakta ve geri dönüşüm süreçlerinin optimizasyonuna odaklanmaktadır. Bu çalışmada, birbiriyle ilişkili olan, çok insanlı demontaj hattı dengeleme problemi, parti boyutlandırma problemi ve tersine tedarik zinciri tasarlama problemi entegre olarak ele alınmaktadır. Böylece, ömrünü tamamlamış ürünlerin geri dönüşümü ve yeniden değerlendirilmesi süreçlerinin optimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, bu üç problemin entegrasyonu sağlanarak, stratejik düzeydeki tersine tedarik zinciri kararları ile taktik düzeydeki demontaj hattı dengeleme problemleri arasındaki ilişki detaylı olarak incelenmektedir. Bu problem için bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmiş ve deneysel veriler kullanılarak problemler test edilmiştir. Ayrıca, merkezi ve merkezi olmayan tersine tedarik zinciri tasarım stratejilerinin sonuçlar üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuç olarak, bu tez çalışması hem akademik hem de uygulamalı alanlarda sürdürülebilir üretim ve tüketim süreçlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, endüstri uygulayıcılarına stratejik ve taktiksel kararlara ilişkin yararlı temel bulgular ve yönetimsel öneriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Demontaj hattı dengeleme, Tersine tedarik zinciri, Geri dönüşüm, Optimizasyon*

Master Thesis

SUMMARY

PRESENTING A HOLISTIC METHODOLOGY FOR OPTIMIZATION-BASED APPROACHES TO SOLVE DISASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEMS

Elif ÖKSÜZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Industrial Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Ömer Faruk YILMAZ
2023, 47 Pages

While the reverse supply chain involves the processes of reclaiming, processing and reusing used or waste products, the disassembly line balancing problem aims to make these processes more efficient and harmonized. An optimized disassembly line contributes to the execution of reverse supply chain processes at lower costs, reducing the amount of waste and using resources more efficiently. This thesis highlights the importance of sustainable production and consumption processes and focuses on the optimization of recycling processes. In this study, the interrelated multi-manned disassembly line balancing problem, the lot sizing problem and the reverse supply chain design problem are addressed in an integrated manner. Thus, it is aimed to optimize the processes of recycling and reuse of end-of-life products. In this study, by integrating these three problems, the relationship between strategic level reverse supply chain decisions and tactical level disassembly line balancing problems is examined in detail. A mixed integer linear programming model is proposed for this problem and the problems are tested using empirical data. Furthermore, the effects of centralized and decentralized reverse supply chain design strategies on the results are analyzed. In conclusion, this thesis plays an important role in the development of sustainable production and consumption processes in both academic and applied fields. It also provides industry practitioners with useful key findings and managerial recommendations for strategic and tactical decisions.

Key Words: *Disassembly line balancing, Reverse supply chain, Recycling, Optimization*

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Öncelik ilişki türleri: (a) *VE* öncelik ilişkisi, (b) *VEYA* öncelik ilişkisi, (c) *VEYA* ardıl ilişkisi 11
Şekil 2. Problem 1 ve Problem 2 öncelik diyagramları 18
Şekil 3. Problem 3 öncelik diyagramı 18
Şekil 4. Problem 4 öncelik diyagramı 19
Şekil 5. Problem 5 öncelik diyagramı 19
Şekil 6. Problem 6 öncelik diyagramı 20
Şekil 7. Toplama Merkezlerinin harita üzerinde görünümü 20
Şekil 8. Merkezi strateji için genel karşılaştırma 33
Şekil 9. Merkezi olmayan strateji için genel karşılaştırma 33

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Literatür matrisi 9
Tablo 2. Ara toplama merkezleri 21
Tablo 3. Ana toplama merkezleri 22
Tablo 4. Problem verileri 23
Tablo 5. Deney tasarımı parametreleri 24
Tablo 6. Deney tasarımı 24
Tablo 7. Merkezi strateji sonuçları (P1-P4) 25
Tablo 8. Merkezi strateji sonuçları (P5 ve P6) 26
Tablo 9. Merkezi olmayan strateji sonuçları (P1-P4) 27
Tablo 10. Merkezi olmayan strateji sonuçları (P5 ve P6) 28
Tablo 11. Merkezi stratejiye göre amaç fonksiyonu için ANOVA sonuçları 29
Tablo 12. Merkezi stratejiye göre koşum süresi için ANOVA sonuçları 29
Tablo 13. Merkezi stratejiye göre MANOVA sonuçları 30
Tablo 14. Merkezi olmayan stratejiye göre MANOVA sonuçları 31

SEMBOLLER DİZİNİ

DHDP	Demontaj Hattı Dengeleme Problemi
EKR	En Kısa Rota
GA	Genetik Algoritma
HV	Hat Verimliliği
İS	İstasyon Sayısı
KKO	Karınca Kolonisi Optimizasyonu
KVK	Kaynakların Verimli Kullanımı
MHDP	Montaj Hattı Dengeleme Problemi
RD	Rota Değişimi
TM	Toplam Maliyet
TK	Toplam Kar
TPÖ	Tehlikeli Parçalara Öncelik
TTZ	Tersine Tedarik Zinciri
YTPÖ	Yüksek Talepli Parçalara Öncelik

1. GİRİŞ

Üreticiler, ekonomik fayda elde etmek ve çevre koruma endişesi nedeniyle hükümetlerin çıkardığı katı mevzuata uymak için ömrünü tamamlamış ürünleri geri kazanma faaliyetlerine odaklanmaya başladılar (Yılmaz and Yazıcı, 2021). Özellikle dünyanın dört bir yanındaki birçok hükümet, yakma ve düzenli depolama sahalarının çevre üzerindeki olumsuz etkileri gibi çevresel nedenlerle üreticiye yasal baskı uyguluyor (Slama ve ark. 2021). İşletmeler birçok alternatif arasında çevresel etkileri önemli ölçüde azalttığı ve ekonomik faydalar sağladığı için, ömrünü tamamlamış ürünlerin geri kazanmak için demontajı düşünür. Bunu göz önünde bulundurarak, atık miktarındaki sürekli artış, işletmelerin ömrünü tamamlamış ürünlerin çevreye daha duyarlı yollarla geri kazanmak için kapalı döngü tedarik zinciri politikalarına uygun olarak yeniden üretim tesisleri inşa etmelerine yol açar (Liu ve ark. 2016). Örneğin Panasonic çamaşır makinelerinde %93, buzdolaplarında %81, klimalarda %95, televizyonlarda %87 oranında geri dönüşüm gerçekleştirmiştir. Ayrıca Apple, iPhone'u parçalarına ayırmak için geliştirdiği Liam sayesinde her yıl 2,4 milyon telefonu geri dönüştürmüştür (Kenger ve ark. 2020).

Demontaj hattı, bir dizi işlem yoluyla bileşenlere (parçalara) ve alt montajlara ayrıştırılan ömrünü tamamlamış ürünlerin geri kazanılması için gereklidir (Liu ve ark. 2020). Elde edilen parçalar yeni ürünler üretmek için yeniden kullanılabilir veya geri dönüşümcülere gönderilebilir (McGovern ve Gupta, 2007). Demontaj hattı dengeleme sorununa bu kadar ilgi gösterilmesinin nedeni, hattın doğru dengelenmesi durumunda ekonomik ve işletme açısından fayda sağlanabilmesidir. Bu nedenle Demontaj Hattı Dengeleme Problemi (DHDP), hem problemin özellikleri hem de gerçek uygulamalar dikkate alınarak çalışmalarda kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Çevikcan vd. 2020). Tanım olarak DHDP, belirli kısıtlamaları yerine getirirken verimliliği artırmak için demontaj görevinin birbirini izleyen istasyonlara (geleneksel veya çok insanlı) atanmasıdır. DHDP probleminin belirli özellikleri, yani öncelik ilişkisi türleri, onu Montaj Hattı Dengeleme Probleminden (MHDP) farklı kılar. Temel MHDP'de, montaj işlemini tamamlamak için tüm görevlerin gerçekleştirilmesi gerekir; ancak DHDP için tüm görevleri gerçekleştirmek gerekli değildir. Örneğin, belirli parçaların talebini karşılamak için bazı görevleri yerine getirmek yeterlidir. Bu özellikleri ile DHDP'nin MHDP'ye göre daha karmaşık olduğunu

söylemek kolaydır (Pour-Massahian-Tafti ve ark. 2020). Bu nedenle MHDP için uygulanan klasik yöntemler DHDP için uygulanamaz. Bu gibi durumlarda, DHDP ve varyantlarını çözmek için probleme özel yaklaşımlar geliştirmek gereklidir.

Geri dönüşüm sürecinde, ürünün kendisini oluşturan alt parçalarının en iyi şekilde analiz edilebilmesini sağlayan ve geride en az miktarda parça kalmasının yolunu açan en etkili yöntemlerden birisi demontajdır (Mcgovern ve Gupta, 2007a). Demontaj sonucu üretime geri kazandırılması mümkün olmayan ya da tehlike oluşturabilecek parçalar ise imha edilmektedir (Güngör ve Gupta, 2001).

Geri dönüşüm sürecinde parçaları elde etmek için yapılan sökme görevleri demontaj hatlarında olmaktadır. Bu görevler yapılırken aralarındaki öncelik ilişkileri dikkate alınır. Demontaj hattında hangi görevlerin, hangi sıraya göre, hangi iş istasyonunda ve ne zaman yapılacağına demontaj hattı dengeleme problemleriyle ulaşılır. Bu problemler minimum maliyetlerle optimum iş istasyonu atayarak görevlerin optimum sürede tamamlanmasını amaçlar.

Tersine lojistik, kullanılmış, geri dönüştürülmüş veya atık ürünlerin, ambalaj malzemelerinin ve bileşenlerinin toplanması, işlenmesi, geri dönüşümü ve yeniden kullanımıyla ilgili süreçleri kapsayan bir lojistik yönetim yaklaşımıdır. Geleneksel lojistik süreçlerinin aksine, tersine lojistik, tüketim noktasından başlayarak ürünlerin kaynağına doğru hareket eder ve ürün yaşam döngüsünün sonraki aşamalarında değer yaratmayı amaçlar. Çevresel sürdürülebilirlik, atık yönetimi ve dolaşım ekonomisi prensipleri ile yakından ilişkilidir. Tersine lojistik, işletmelerin enerji ve malzeme verimliliğini artırarak maliyetleri azaltmasına, aynı zamanda çevresel düzenlemelere uyum sağlamasına ve sosyal sorumluluk hedeflerini gerçekleştirmesine yardımcı olur. Bu nedenle, tersine lojistik hem akademik hem de uygulamalı alanlarda büyük ilgi görmekte ve giderek önem kazanmaktadır.

Demontaj Hattı Dengeleme Problemi (DHDP) ve Tersine Lojistik (TL) arasındaki ilişki, geri dönüşüm ve geri kazanım süreçlerini optimize etmek için kullanılan yöntemlerin ve stratejilerin birleşimidir. Tersine lojistik, kullanılmış veya atık ürünlerin geri toplanması,

işlenmesi ve yeniden değerlendirilmesi süreçlerini içerirken, demontaj hattı dengeleme probleminde ise bu süreçlerin daha verimli ve uyumlu hale getirilmesi amaçlanır.

DHDP, demontaj işlemlerinin farklı istasyonlara atanarak gerçekleştirildiği bir üretim hattında, iş yükünün eşit şekilde dağıtılmasını sağlamayı hedefler. Bu, iş istasyonları arasındaki süre ve maliyetleri en aza indirirken, toplanan malzemelerin ve bileşenlerin yeniden kullanımı veya geri dönüşümü için en uygun süreçlerin belirlenmesine olanak tanır.

Tersine lojistik ve DHDP arasındaki ilişki hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik verimlilik açısından önemlidir. İyi optimize edilmiş bir demontaj hattı, tersine lojistik süreçlerinin daha düşük maliyetlerle yürütülmesine, atık miktarının azaltılmasına ve kaynakların daha verimli kullanılmasına katkıda bulunur. Bu bağlamda, DHDP ve tersine lojistik arasındaki ilişki, akademik çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda sürdürülebilir üretim ve tüketim süreçlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynar.

Mevcut çalışmalardan farklı olarak, bu çalışma aynı anda birbiriyle ilişkili üç soruna odaklanmaktadır: (i) çok insanlı demontaj hattı dengeleme problemi, (ii) parti boyutlandırma problemi ve (iii) Tersine Tedarik Zinciri (TTZ) tasarlama problemi. İlk iki problem söküm hattı için taktik seviyedeki kararlarla ilgiliyken, üçüncü problem TTZ için stratejik seviyedeki kararlarla ilgilidir. Bir yandan, çok-insanlı DHDP, çok-insanlı istasyonlara görev ve işçi atamasının, yani grup tabanlı atamanın belirlenmesi problemidir. Parti boyutlandırma problemi, belirli bir planlama ufku boyunca (tek veya çoklu dönemler) demonte edilecek ömrünü tamamlamış ürünlerin miktarını belirlemektir. Öte yandan, TTZ tasarım problemi, ömrünü tamamlamış ürünleri toplamak ve dağıtmak için tesis açma ve dağıtım kararlarını toplama merkezlerinden sökme merkezlerine merkezi ve merkezi olmayan stratejiler göz önünde bulundurarak vermektir. İstasyon açma, envanter tutma, eksiklik, dağıtım, tesis açma maliyetlerinden oluşan toplam maliyeti en aza indirmek amacıyla sorunları entegre etmek için genel bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Problemler entegre edilerek, TTZ'ye ilişkin stratejik düzeydeki kararlar ile DHDP'ye ilişkin taktik düzeydeki kararlar arasındaki ilişki ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın dikkate değer katkıları aşağıda özetlenmiştir.

(i) Yazarların bildiği kadarıyla, entegre sorun şu ana kadar mevcut akademik literatürde ele alınmamıştır. Çok insanlı DHDP, lot boyutlandırma, TTZ tasarım problemleri çeşitli çalışmalarda ayrı ayrı incelenmiştir; ancak birbiriyle ilişkili bu sorunlar aynı anda araştırılmamıştır.

Teorik açıdan bakıldığında;

(ii) Ele alınan problem için kapsamlı bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir.

(iii) Araştırılan problem için çok insanlı istasyonların, yani grup tabanlı atamanın etkisi incelenir.

(iv) Sonuçlar üzerindeki etkilerini analiz etmek için merkezi ve merkezi olmayan tersine tedarik zinciri tasarım stratejileri kullanılır.

Yönetimsel etkilere gelince,

(v) Endüstri uygulayıcıları için stratejik ve taktiksel kararlara ilişkin yararlı temel bulgular ve yönetimsel içgörüler ortaya çıkar.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Demontaj Hattı Dengeleme Problemi (DHDP) ve tersine lojistik, sürdürülebilir üretim ve tüketim süreçlerinin önemli bileşenleri olarak günümüzde büyük ilgi görmektedir. Bu literatür araştırması, geri dönüşüm ve yeniden kullanım süreçlerini optimize etmeye yönelik stratejilerin ve metodolojilerin incelenmesine odaklanır. DHDP, etkin ve verimli demontaj süreçlerini sağlamak amacıyla demontaj hatlarında gerçekleştirilen işlemlerin dengelenmesine ilişkin kavramları ve teknikleri ele alırken, tersine lojistik, ürün yaşam döngüsünün sonunda kullanılmış malzemelerin toplanması, işlenmesi, geri dönüşümü ve yeniden kullanımını kapsayan süreçleri inceler. Bu bağlamda, araştırmanın amacı, DHDP ve tersine lojistik alanlarında yapılan çalışmaları sistematik bir şekilde inceleyerek, bu konular arasındaki ilişkileri ve mevcut yöntemleri, uygulamaları ve araştırma eğilimlerini değerlendirmektir. Bu bölümde Demontaj Hattı Dengeleme Problemi (DHDP) ve Tersine Lojistik (TTZ) ile ilgili akademik literatürde yer alan çalışmalara yer verilmiştir.

Yapılan ilk çalışmalarda Gupta ve Taleb (1994)'in, demontaj hattının montaj hattının tersi gibi görülmesine rağmen daha karmaşık yapıya sahip olduğunu ortaya koyarak literatüre yeni bir alan kazandırmışlardır. Gungor ve Gupta (2001) çalışmalarında bir veya birden fazla görevin yerine getirilemediği durumlarda öncelik ilişkilerinden dolayı sonrasında gelen görevlerin yapılamayacağını vurgulamışlardır. Mcgovern ve Gupta (2007), çok amaçlı problemlerin hesaplama açısından zorluğunu göz önünde bulundurarak genetik algoritma, karınca koloni algoritması, açgözlü arama algoritması, tepe tırmanma algoritması metotlarını içeren meta-sezgisel, sezgisel ve hibrit yaklaşımlar önermiştir.

Agrawal ve Tiwari (2008), problem için U-tipi demontaj hattı önermiş ve görev sürelerinin belirsizliğini göz önünde bulundurarak işbirlikçi karınca kolonisi optimizasyonunu kullanmıştır. Altekin vd. (2008), problemde kar maksimizasyonu için bütün görevlerin yapılma zorunluluğu olmadığı varsayımıyla görev-parça ilişkilerini inceleyerek optimizasyon modeli önermiştir. Ding vd. (2010), Çok amaçlı problemler üzerinde durarak meta-sezgisel karınca kolonisi algoritmasını kullanarak Pareto optimal çözümler sunmuştur.

İlerleyen süreçte Aydemir-Karadag ve Turkbey (2013), çok amaçlı DHDP için paralel istasyon yapısını önermiş ve iki farklı amaç için Pareto optimal sonuçları değerlendirerek genetik algoritmayı kullanmıştır. Öncelik ilişkilerini VE/VEYA grafikleri ile ifade etmiştir. Bentaha vd. (2014), tehlikeli parçaların ve belirsiz görev sürelerinin söz konusu olduğu durumlarda ürünlerin kısmi sökme işleminin yapılarak dengelenmesini ele almış ve maksimum kar amacına ulaşmak için Monte Carlo simülasyonuna dayanan ve kesin sonuç veren bir çözüm önerisi getirmiştir. Teknolojik öncelik diyagramlarını ele alan Hezer ve Kaya (2014), DHDP için paralel hat sunmuş ve en kısa rotayı bulmayı hedeflemiştir.

DHDP son yıllarda tersine lojistik alanında ilgi görmeye başlamıştır. Özceylan ve Paksoy (2013), problemde tersine tedarik zincirini optimuma getirmek amacıyla müşteriyi, toplama ve sökme merkezlerini, taşıma maliyetlerini, açılan iş istasyonlarının maliyetlerini ve demontaj hattının dengelenmesini ele almıştır. Doğrusal olmayan bir karma tam sayılı programlama modeli ile, tesisler arasında minimum maliyetle optimum iş dağılımını, açılacak iş istasyonunu optimum sürede uygun şekilde atanması amaçlanmıştır. Özceylan vd. (2014), nakliye, yenileme ve iş istasyonlarının toplam maliyetlerini en aza indirmek amacıyla ileri ve geri tedarik zinciri en iyilemek amacıyla çözüm sunmuştur. Kannan vd. (2016), demontaj hattı dengelemesini planlama kurtarma ağına görev çizelgeleme yolu ile entegre eden üçüncü taraf perspektifinden uygun maliyetli ve verimli bir tersine lojistik ağı tasarlamış ve karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli geliştirilmiştir.

Habibi vd. (2014), ömrünü tamamlamış ürünlerin toplanması ve demontajı için sırasıyla araç rotalama problemini ve demontaj hattı dengeleme problemini entegre etmiş, ürün toplama ve demontaj iş istasyonlarının açılmasında oluşan toplam maliyeti en aza indirmeyi amaçlamıştır. Habibi vd. (2017), çalışmalarında kapalı çevrim ağ tasarımı ve demontaj hattı dengeleme kararlarını entegre ederek karışık tam sayılı doğrusal olmayan bir problem sayesinde talep edilen ürünlerin daha düşük toplam maliyet ile çözümüne ulaşmıştır. Çalışmada toplama rotası problemi ve demontaj parti büyüklüğü problemine odaklanan entegre bir planlama sunulmuştur.

Yakın zamanda yapılan bazı çalışmalardan Li vd. (2019), ve/veya öncelikli demontaj hattı dengeleme problemi için dal, sınır ve hatırla algoritması kullanarak performans ölçütü olan istasyon sayısının en aza indirilmesini ele almış ve önerilen yöntem meta-sezgiselden

daha iyi performans göstermiştir. Yılmaz ve Yazıcı (2020), zaman ve kaynak kullanımında etkili bir yöntem olan takım çalışması ve çalışanların heterojenliğini dikkate alarak Çok Amaçlı Bir Demontaj Hattı Dengeleme Problemini (ÇADHDP) Meta-sezgisel bir çözüm yöntemi kullanarak optimize etmişlerdir.

İncelenen çalışmalar literatür matrisi kapsamında Tablo 1'de gösterilmektedir. Tabloda, farklı çalışmalarda demontaj hattı dengeleme problemlerine yönelik amaçlar, hat tipleri, ürün tipleri, çözüm yöntemleri ve tersine lojistik ilişkileri gösterilmektedir. İncelenen çalışmalar analiz edildiğinde aşağıdaki hususlar dikkat çekmektedir:

1. Çalışmaların çoğu, tek tip demontaj hattı (I-tipi) üzerinde odaklanmıştır ve bu hat tipiyle ilgili problemleri ele almıştır. Bu durum, I-tipi demontaj hatlarının daha yaygın olduğunu ve endüstrilerde daha fazla uygulama alanı bulduğunu göstermektedir.

2. Ürün tipleri açısından, çoğu çalışma tek ürün tipine yönelik demontaj süreçlerini ele alırken, sadece birkaç çalışma karma ürün tiplerine odaklanmıştır. Bu durum, demontaj süreçlerinin karmaşıklığını ve farklı ürün tiplerinin yönetim zorluklarını göstermektedir.

3. Çözüm yöntemleri olarak, sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler (Örneğin; Genetik Algoritma ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu) yaygın olarak kullanılmıştır. Bu yöntemler, demontaj hattı dengeleme problemlerinin karmaşıklığı ve NP-zor doğası nedeniyle tercih edilmiştir. Bununla birlikte, karma tamsayılı programlama ve stokastik programlama gibi doğrusal ve doğrusal olmayan optimizasyon yöntemleri de kullanılmıştır.

4. Tersine lojistik bağlamında, sadece birkaç çalışma bu konuyu ele almıştır ve demontaj hattı dengeleme problemlerinin tersine lojistik süreçleri ile ilişkisini incelemiştir. Bu durum, tersine lojistik ve demontaj hattı dengeleme arasındaki potansiyel ilişkilerin ve sinerjilerin daha fazla araştırılması gerektiğini düşündürmektedir.

5. Çalışmaların amaçları arasında, istasyon sayısı, hat dengeleme, tehlikeli parçalara öncelik, yüksek talepli parçalara öncelik, rota değişimi, kaynakların verimli kullanımı,

hat verimliliği, toplam kar ve toplam maliyet gibi farklı kriterler bulunmaktadır. Bu amaçlar, demontaj hattı dengeleme problemlerinin farklı yönlerini ve endüstriyel uygulamalarını temsil etmektedir.

Bu çalışmalarda da görüldüğü üzere DHDP literatürde kapsamlı bir şekilde araştırılmış olmasına rağmen, özellikle operasyonel düzeyde maliyetleri optimize etmeye yol açabilecek tersine lojistik ağı ile entegre edilen çok az çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada ele alınacak amaçlar daha önce hiçbir çalışmada beraber dikkate alınmamıştır. Literatürdeki bu eksiklikler göz önünde alındığında yapılan bu çalışma ile literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Tablo 1. Literatür matrisi

Çalışma	Amaç	Hat tipi	Ürün tipi	Çözüm Yöntemi	Tersine Lojistik
Güngör ve Gupta (2001)	İS	I-tipi	Tek	Sezgisel	Yok
Mcgovern ve Gupta (2007)	İS, HD, TPÖ, YTPÖ, RD	I-tipi	Tek	Meta-sezgisel (GA)	Yok
Agrawal ve Tiwari (2008)	KVK, HV	U-tipi	Karma	Meta-sezgisel (KKO)	Yok
Altekin vd. (2008)	TK	I-tipi	Tek	Sezgisel	Yok
Ding vd. (2010)	İS, HD	I-tipi	Tek	Meta-sezgisel (ÇAKKO)	Yok
Aydemir-Karadağ ve Türkbey (2013)	HD, TM	I-tipi	Tek	Meta-sezgisel (GA)	Yok
Özceylan ve Paksoy (2013)	İS, TM	I-tipi	Tek	Karma tamsayılı doğrusal olmayan prog.	Var
Özceylan vd. (2014)	TM	I-tipi	Tek	Karma tamsayılı doğrusal olmayan prog.	Yok
Bentaha vd. (2014)	TK	I-tipi	Tek	Stokastik programlama	Yok
Hezer ve Kara (2014)	EKR	Paralel	Tek	En kısa yol modeli	Yok
Habibi vd. (2014)	TM	I-tipi	Tek	Karma tamsayılı doğrusal olmayan prog.	Var
Kannan vd. (2016)	TM	I-tipi	Karma	Karma tamsayılı doğrusal olmayan prog.	Var
Habibi vd. (2017)	TM	I-tipi	Tek	Karma tamsayılı doğrusal olmayan prog.	Var
Li vd. (2019)	İS	I-tipi	Tek	Dal, Sınır ve Hatırlama Algoritması	Yok
Yılmaz ve Yazıcı (2020)	TM, CT AND WI	I-tipi	Tek	Karma tamsayılı prog. ve NSGA-II	Yok
Bu çalışma	TM	I-tipi	Tek	Karma tamsayılı doğrusal programlama	Var

İS: İstasyon Sayısı, HD: Hat Dengeleme, TPÖ: Tehlikeli Parçalara Öncelik, YTPÖ: Yüksek Talepli Parçalara Öncelik, RD: Rota Değişimi, KVK: Kaynakların Verimli Kullanımı, HV: Hat Verimliliği, TK: Toplam Kar, TM: Toplam Maliyet, EKR: En Kısa Rota, GA: Genetik Algoritma, KKO: Karınca Kolonisi Optimizasyonu, ÇAKKO: Çok amaçlı karınca kolonisi optimizasyonu, NSGA-II: Baskın olmayan Sıralamalı Genetik Algoritma-II

3. PROBLEMİN TANIMI VE OPTİMİZASYON MODELİ

Bu bölümde problem ayrıntılarıyla birlikte açıklanmış ve problem için geliştirilen optimizasyon modeline yer verilmiştir.

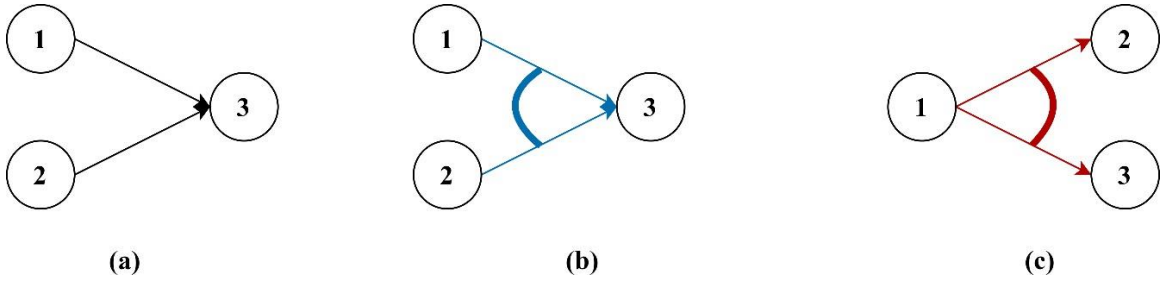
3.1. Problemin Tanımı

Demontaj Hattı Dengeleme Problemi (DHDP), geri dönüşüm sürecinde talebi olan parçaların atık ürünlerden elde edilmesinde demontaj yönteminin belirlenmesiyle ilgilenir. Demontaj yöntemi montaj yönteminin tersi gibi görünse de DHDP; görevler arasındaki ilişki türleri, sökülecek ürünlerin içerdiği tehlike oluşturabilecek parçalar, tüm görevlerin yapılma zorunluluğunun olmaması gibi nedenlerden dolayı Montaj Hattı Dengeleme Problemlerine (MHDP) göre daha kapsamlı konumdadır (Gungor ve Gupta, 2001).

Demontaj işlemi yapılırken üründe hasar oluşturma ihtimalinden dolayı tüm görevlerin yapılmasına gerek yoktur. Ayrıca bazı durumlarda bir görevin yapılabilmesi için öncesinde yapılması gereken farklı görevlerin en az bir tanesinin yapılması yeterli olabilmekte ya da sonrasında yapılması gereken farklı görevlerin en fazla bir tanesinin yapılması yeterli olabilmektedir. Tüm bu işlemler göz önünde bulundurularak görevler arası üç farklı ilişki türü belirlenmiştir. Bu ilişki türü Şekil 1'de gösterilmektedir.

- VE öncelik ilişkisi: Bu ilişki türünde öncesinde yapılması gereken görevlerin yapılması şarttır. (Şekil 1(a)).
- VEYA öncelik ilişkisi: Bu ilişki türünde işlemin öncesinde yapılması gereken farklı görevlerden en az birinin yapılması şarttır. (Şekil 1(b)).
- VEYA ardıl ilişkisi: Bu ilişki türünde sonrasında işlemin sonrasında yapılması gereken farklı görevlerden en fazla birinin yapılması şarttır. (Şekil 1 (c)).

Bu ilişki türleri dikkate alınarak ürünün demontaj adımlarını ifade etmek amacıyla parça tabanlı ve görev tabanlı olmak üzere iki farklı öncelik diyagramı kullanılmaktadır. Parça tabanlı öncelik diyagramlarında görev sürelerinin analizi daha zor olduğu için fazla kullanılmamaktadır. Görev tabanlı öncelik diyagramları ise sökme görevleri arasındaki ilişkiye göre oluşturulmaktadır.



Şekil 1. Öncelik ilişki türleri: (a) *VE* öncelik ilişkisi, (b) *VEYA* öncelik ilişkisi, (c) *VEYA* ardıl ilişkisi

Bu çalışmada kapsamında ele alınan problemlerdeki varsayımlar aşağıda açıklanmaktadır.

- Hangi görevden hangi parçanın/ parçaların kaç adet ayrıldığı, hangi görevde hangi parçanın kullanıldığı bilinmektedir.

- Her görevin standart işlem süreleri ve hangi görevin hangi çalışan tarafından ne kadarlık bir yeterlilik seviyesi ile yapıldığı ya da yapılamadığı öngörülmektedir.

- Görevler arasında *VE, VEYA* öncelik ile *VEYA* ardıl ilişki türleri bulunmaktadır. Bir görevin yapılabilmesi için bu ilişki türlerinin yerine getirilmiş olması şarttır.

- Aralarında öncelik ilişkisi bulunan iki görevden biri bitmeden diğer görev başlayamaz ve aynı zamanda bir çalışan bir görevi bitirmeden diğer göreve başlayamaz.

3.2. Optimizasyon Modeli

İndisler ve Kümeler;

i, s	sökme görev indisi	
j, h	istasyon indisi	
k	sökülen parça indisi	
w	çalışan indisi	
b	sökülen parça sayısını tanımlayan indis	
e	toplama merkezi indisi	
TS	görev kümesi	$TS = \{1,..., I\}$
ST	istasyon kümesi	$ST = \{1,..., \|TS\|\}$
SW	çalışan kümesi	$SW = \{1,..., W_{MAX}\}$

SK	sökülen parça kümesi	$SK = \{1,...,K\}$
SB	sökülen parça sayısını içeren küme	$SB = \{1,...,B\}$
SE	toplama merkezi sayısının içeren küme	$SE = \{1,...,E\}$
P^A_i	*i.* görev için *VE* öncelik ilişki kümesi	
P^O_i	*i.* görev için *VEYA* öncelik ilişki kümesi	
S^O_i	*i.* görev için *VEYA* ardıl ilişki kümesi	

Parametreler;

W_{MAX}	bir istasyona atanabilecek maksimum çalışan sayısı
Time	demontaj için tüm işlemlere ayrılabilecek toplam süre
FC	istasyon açma maliyeti
HC	sökülen ürünün elde bulundurma maliyeti
PC	sökülen ürünün elde bulundurmama maliyeti
VC_e	*e*. toplama merkezinin açılma maliyeti
RC_e	*e*. toplama merkezinin yol maliyeti
WC	çalışan ücreti
TrCa	araç kapasitesi
C	çevrim süresinin hesaplanmasında kullanılan yardımcı parametre
L	pozitif büyük bir sayı
t_i	i. görevin standart işlem süresi
d_k	*k.* parçaya olan talep
VCa_e	*e.* toplama merkezinin kapasitesi

$$m_{ik} = \begin{cases} m_{ik} \geq 1; & k.\text{parça } i.\text{görev sonucu } m_{ik} \text{ adet oluşuyorsa (1 üründen)} \\ m_{ik} = -1; & k.\text{parça } i.\text{görevde kullanılıyorsa} \\ m_{ik} = 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Değişkenler;

$$x_{ijw} = \begin{cases} 1; & i.görev\ j.\text{istasyonda } w.\text{çalışan tarafından yapılıyorsa} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$\forall i \in TS;\ \forall j \in ST;\ \forall w \in SW$$

$$y_{is} = \begin{cases} 1; & i.\text{görev aynı çalışan tarafından } s.\text{görevden önce yapılıyorsa} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$\forall i \in TS;\ \forall s \in TS$$

$$st_j = \begin{cases} 1; & j.\text{istasyon açıldıysa} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \qquad \forall j \in ST$$

$$z_e = \begin{cases} 1; & e.\text{toplama merkezi açıldıysa} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$ws_{jw} = \begin{cases} 1; & w.\text{çalışan } j.\text{istasyona atandıysa} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \qquad \forall j \in ST;\ \forall w \in SW$$

$$epor_{is} = \begin{cases} 1; & s.\text{görev } i.\text{görev için VEYA öncelik teşkil ediyorsa} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$\forall i \in \{g: g \in TS \wedge P_g^{OR} \neq \emptyset\}; \forall s \in P_i^{OR}$$

$$pr_b = \begin{cases} 1; & \text{b indisi sökülmesi gereken parça sayısına eşit ya da azsa} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \qquad \forall b \in SB$$

V_e *e.* toplama merkezinden gönderilen ürün sayısı

Tr_e *e.* toplama merkezine gönderilecek araç sayısı

CT çevrim süresi

$strt_{ij}$ *i.* görevin *j.* istasyonda başlama süresi $\forall i \in TS;\ \forall j \in ST$

p_i *i.* görev için sökülmesi gereken ürün sayısı $\forall i \in TS$

Product talebin karşılanması için sisteme girmesi gereken ürün sayısı

Q sisteme girmesi gereken optimum ürün sayısı

Amaç Fonksiyonu;

$$\text{Min f} = FC \times \sum_{j \in ST} st_j + HC \times \frac{Q}{2} + \sum_{k \in SK} PC_k \times (d_k - d2_k) + WC \times \sum_{w \in SW} \sum_{j \in ST} ws_{jw} + \sum_{e \in SE} VC_e \times z_e + \sum_{e \in SE} RC_e \times Tr_e \qquad (1)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j\in ST}\sum_{w\in SW} x_{ijw} \le 1 \qquad \forall i \in TS \tag{2}$$

$$\sum_{i\in TS} x_{ijw} - |TS| \times ws_{jw} \le 0 \quad \forall j \in ST;\ \forall w \in SW \tag{3}$$

$$\sum_{w\in SW} ws_{jw} - W_{MAX} \times st_j \le 0 \qquad \forall j \in ST \tag{4}$$

$$d2_k \le L \times \sum_{i\in TS} m_{ik} \times \sum_{j\in ST}\sum_{w\in SW} x_{ijw} \qquad \forall k \in SK \tag{5}$$

$$d_k \ge d2_k \qquad \forall k \in SK \tag{6}$$

$$\sum_{i\in TS} Q \times m_{ik} \ge d2_k \qquad \forall k \in SK \tag{7}$$

$$C \times \sum_{b\in SB} pr_b \ge Q \tag{8}$$

$$CT \times C \times b \le Time + L \times (1 - pr_b) \qquad \forall b \in SB \tag{9}$$

$$\sum_{w\in SW} x_{ijw} - \sum_{h=1}^{j}\sum_{w\in SW} x_{shw} \le 0$$
$$\forall i \in \{g: g \in TS\ \Lambda\ P_g^A \ne \emptyset\};\ \forall s \in P_i^A;\ \forall j \in ST \tag{10}$$

$$\sum_{w\in SW} x_{ijw} - \sum_{h=1}^{j}\sum_{w\in SW} x_{shw} \le L \times (1 - epor_{is})$$
$$\forall i \in \{g: g \in TS\ \Lambda\ P_g^O \ne \emptyset\};\ \forall s \in P_i^O;\ \forall j \in ST \tag{11}$$

$$\sum_{s\in P_i^O} epor_{is} \ge 1 \qquad \forall i \in \{g: g \in TS\ \Lambda\ P_g^O \ne \emptyset\} \tag{12}$$

$$\sum_{j\in ST}\sum_{w\in SW} x_{ijw} - \sum_{s\in S_i^O}\sum_{j\in ST}\sum_{w\in SW} x_{sjw} \geq 0 \qquad \forall i \in \{g: g \in TS \wedge S_g^O \neq \emptyset\} \tag{13}$$

$$strt_{ij} + t_i \leq CT \qquad \forall i \in TS, \forall j \in ST \tag{14}$$

$$strt_{ij} - strt_{sj} + L \times \left(1 - \sum_{w\in SW} x_{sjw}\right) + L \times \left(1 - \sum_{w\in SW} x_{ijw}\right) \geq t_s$$
$$\forall i \in \{g: g \in TS \wedge P_g^A \neq \emptyset\};\ \forall s \in P_i^A;\ \forall j \in ST \tag{15}$$

$$strt_{ij} - strt_{sj} + L \times \left(1 - \sum_{w\in SW} x_{sjw}\right) + L \times \left(1 - \sum_{w\in SW} x_{ijw}\right)$$
$$\geq t_s - L \times (1 - epor_{is})$$
$$\forall i \in \{g: g \in TS \wedge P_g^O \neq \emptyset\};\ \forall s \in P_i^O;\ \forall j \in ST \tag{16}$$

$$strt_{ij} - strt_{sj} + L \times (1 - x_{sjw}) + L \times (1 - x_{ijw}) + L \times (y_{is}) \geq t_s$$
$$\forall i \in TS;\ \forall s \in TS;\ \forall j \in ST;\ \forall w \in SW \tag{17}$$

$$strt_{sj} - strt_{ij} + L \times (1 - x_{sjw}) + L \times (1 - x_{ijw}) + L \times (1 - y_{is}) \geq t_s$$
$$\forall i \in TS;\ \forall s \in TS;\ \forall j \in ST;\ \forall w \in SW \tag{18}$$

$$Q \leq \sum_{e\in SE} V_e \tag{19}$$

$$V_e \leq VCa_e \times z_e \qquad \forall e \in SE \tag{20}$$

$$TrCa \times Tr_e \geq V_e \qquad \forall e \in SE \tag{21}$$

$$strt_{ij} \geq 0,\ CT \geq 0 \qquad \forall i \in TS; \forall j \in ST$$
$$x_{ijw} \in \{0,1\},\ st_j \in \{0,1\},\ ws_{jw} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in TS; \forall j \in ST; \forall w \in SW$$
$$y_{is} \in \{0,1\},\ pr_b \in \{0,1\} \qquad \forall i \in TS; \forall s \in TS; \forall b \in SB$$
$$epor_{is} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in \{g: g \in TS \wedge P_g^O \neq \emptyset\}\ \forall s \in P_i^O \tag{22}$$

Kısıt (1) amaç fonksiyonunu göstermektedir. Kısıt (1) istasyon açma, elde bulundurma, elde bulundurmama, çalışan, toplama merkezi açma ve ürünlerin taşınma maliyetlerini dikkate alarak maliyeti minimize eder.

Kısıt seti (2)-(3)-(4) modelin temel kısıtlarıdır ve değişkenlerin tanımlanmasını, birbirleri ile ilişki kurmalarını, takım çalışmasının temel özelliklerinin yerine getirilmesini sağlar. Kısıt (2) ile her görevin yapılma zorunluluğunun olmadığı ve bir görevin en fazla bir istasyonda bir çalışan tarafından yapılabileceği ifade edilmiştir. Kısıt (3)'de, görev atama değişkeni ile çalışan atama değişkeni arasında ilişki kurulmuştur. Kısıt (4)'da istasyon açma değişkeni ile çalışan atama değişkeni arasında ilişki kurulmuş, aynı zamanda bir istasyona en fazla W_{MAX} adet çalışanın atanabilmesine izin vermiştir. Çalışan beceri/ yetenek seviyeleri göz ardı edilerek tüm çalışanlar eşit kabul edilmiş ve her istasyona atanan çalışanların farklı çalışan olduğu kabul edilmiştir.

Kısıt seti (5)-(6)-(7) parçaların taleplerinin karşılanmasını sağlayan kısıtlardır. Kısıt (5)'de talebin karşılanması için parçanın üretildiği görevin yapılmasını şart koşar. Kısıt (6) talebin en fazla maksimum düzeyde karşılanacağını kısıtlar. Böylece negatif elde bulundurmamam maliyetinin oluşması engellenir. Kısıt (7) karşılanan parça talepleri ile tedarik edilen ürün miktarı arasında ilişki kurar.

Kısıt seti (8)-(9) çevrim süresini takt zamanı ile sınırlayan kısıtlardır. Kısıt (8)'de demonte edilmesi gereken minimum ürün sayısı $C*b$'ye eşit oluncaya kadar pr_b değişkenine "1" değeri atanır. Böylece takt zamanı kısıt (9)'da doğrusal bir kısıt ile hesaplanmış olur.

Kısıt seti (10)-(11)-(12)-(13) öncelik ilişkilerini kurar. Kısıt (10) bir görevin yapılabilmesi için *VE* öncelik kümesindeki önceliğinin/önceliklerinin yapılmış olmasını garanti etmektedir. Kısıt (11) ve (12) *VEYA* öncelikleri olan bir görevin yapılabilmesi için *VEYA* önceliklerinden en az birinin yapılmış olmasını şart koşarken, kısıt (13)'da bir görevin *VEYA* ardıllarından en fazla birinin yapılabileceği koşullanır.

Kısıt (14)-(15)-(16) görevlerin istasyonlara atanmalarında zaman sıralaması yapar. Kısıt (14) her görevin çevrim süresinden önce bitmesini sağlar. Kısıt (15) ve (16) ise görevlerin başlama zamanlarında sırasıyla *VE* ve *VEYA* önceliklerinin bitmiş olmasının dikkate alınmasını sağlar.

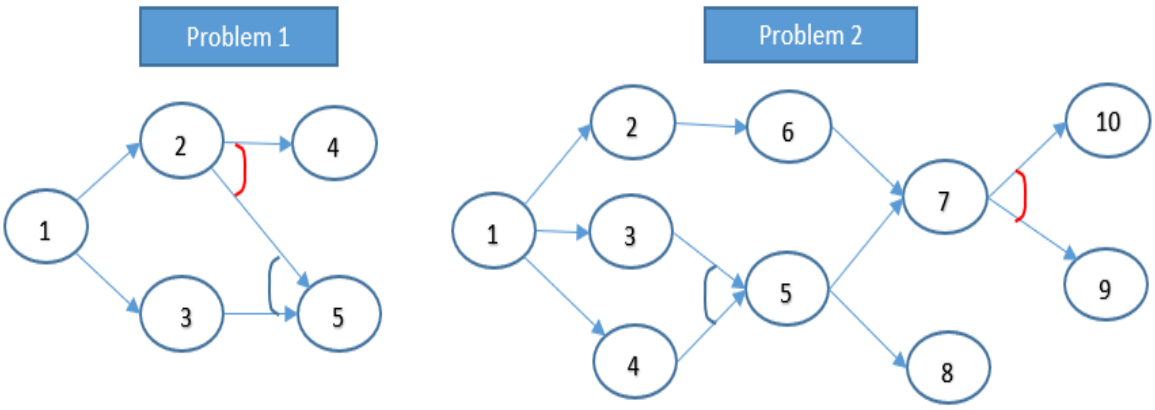
Kısıt seti (17)-(18), bir çalışanın bir görevi bitirmeden diğer göreve başlayamamasını sağlar.

Kısıt seti (19)-(20)-(21), tedarik zinciri yönetimini sağlayan kısıtlardır. Kısıt (19) optimum ürün miktarının karşılanması için hangi toplama merkezlerinin açılacağını ve toplama merkezlerinden ne kadar ürün toplanacağını belirler. Kısıt (20) toplama merkezinin açılma kararı alır ve kapasite kısıtlaması getirir. Kısıt (21) ilgili toplama merkezine gitmesi gereken araç sayısını belirler. Son olarak kısıt (22) ise değişkenlere işaret kısıtlamaları getirir.

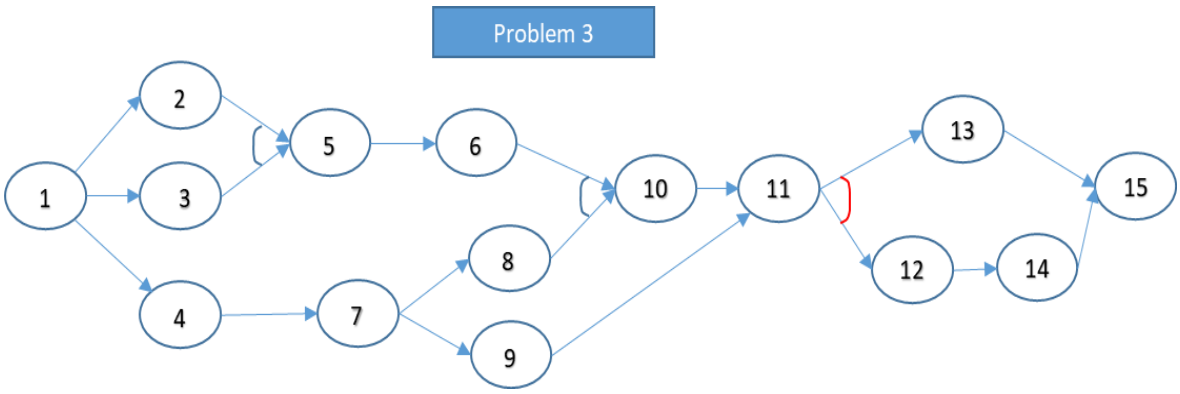
4. UYGULAMA

4.1. Deneysel Veriler

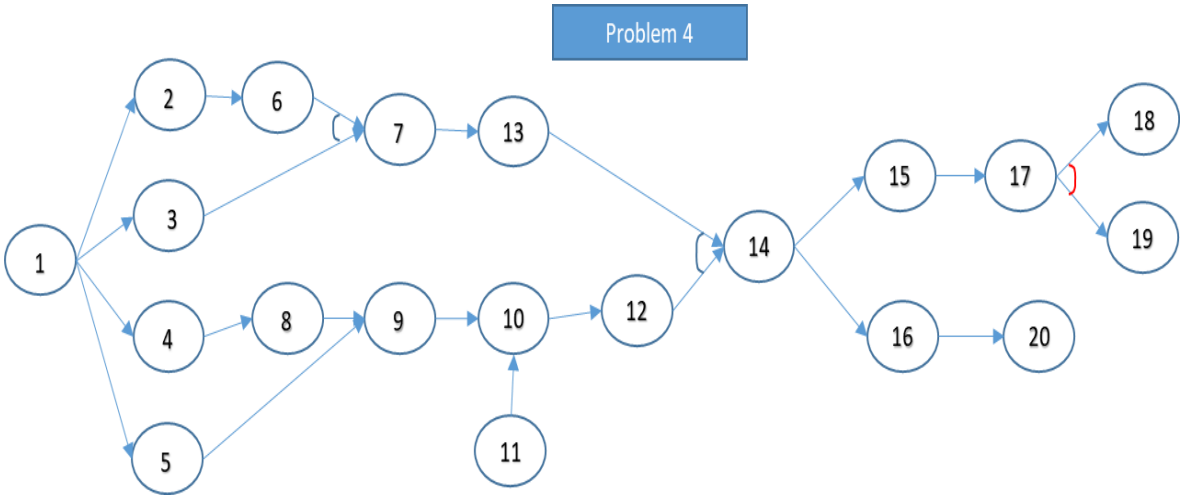
Bu çalışmada önerilen modeli test etmek amacıyla farklı ölçekte 6 problem tanımlanmıştır. Problemler üretilirken ve/veya ilişkisi, öncüllük/ardıllık ilişkileri gibi unsurlar dikkate alınmış ve farklı görev sayıları ele alınmıştır. Bu çalışma kapsamında ele alınan demontaj hattı dengeleme ve tersine tedarik zinciri problemlerinin öncelik diyagramları aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



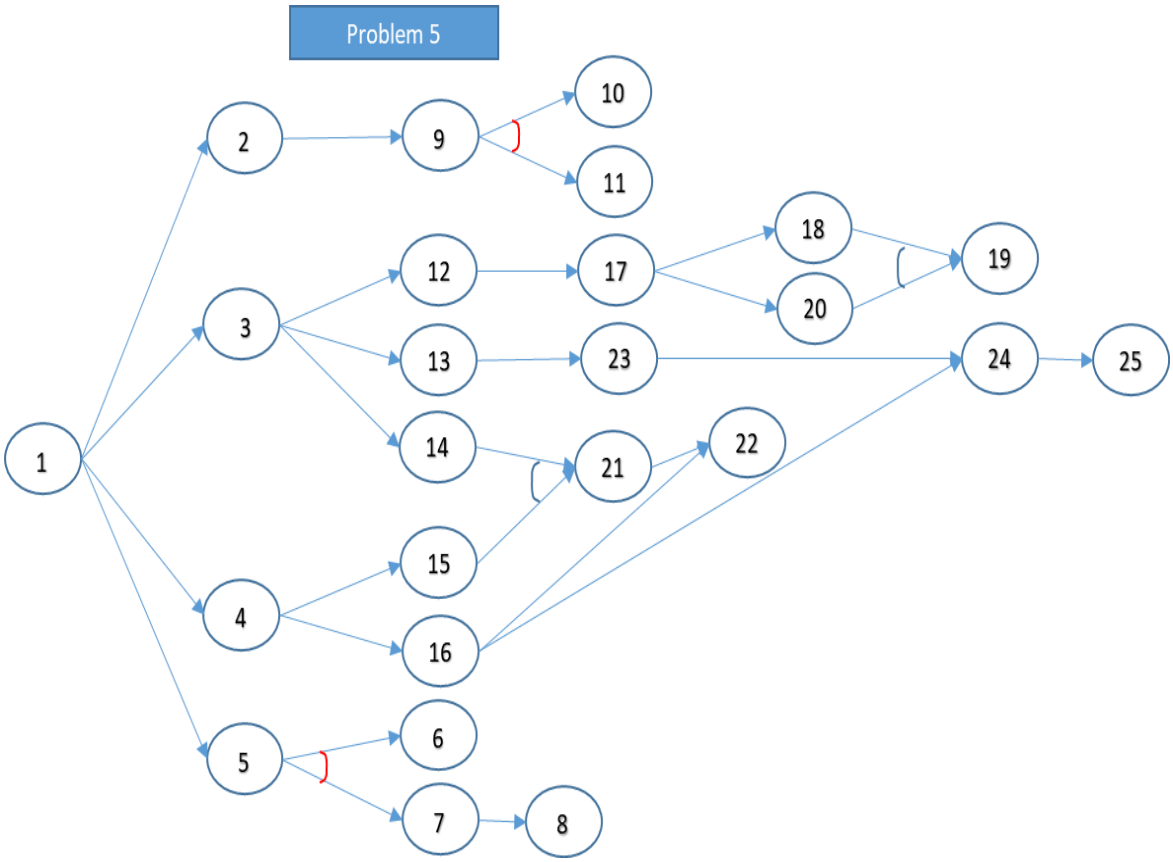
Şekil 2. Problem 1 ve Problem 2 öncelik diyagramları



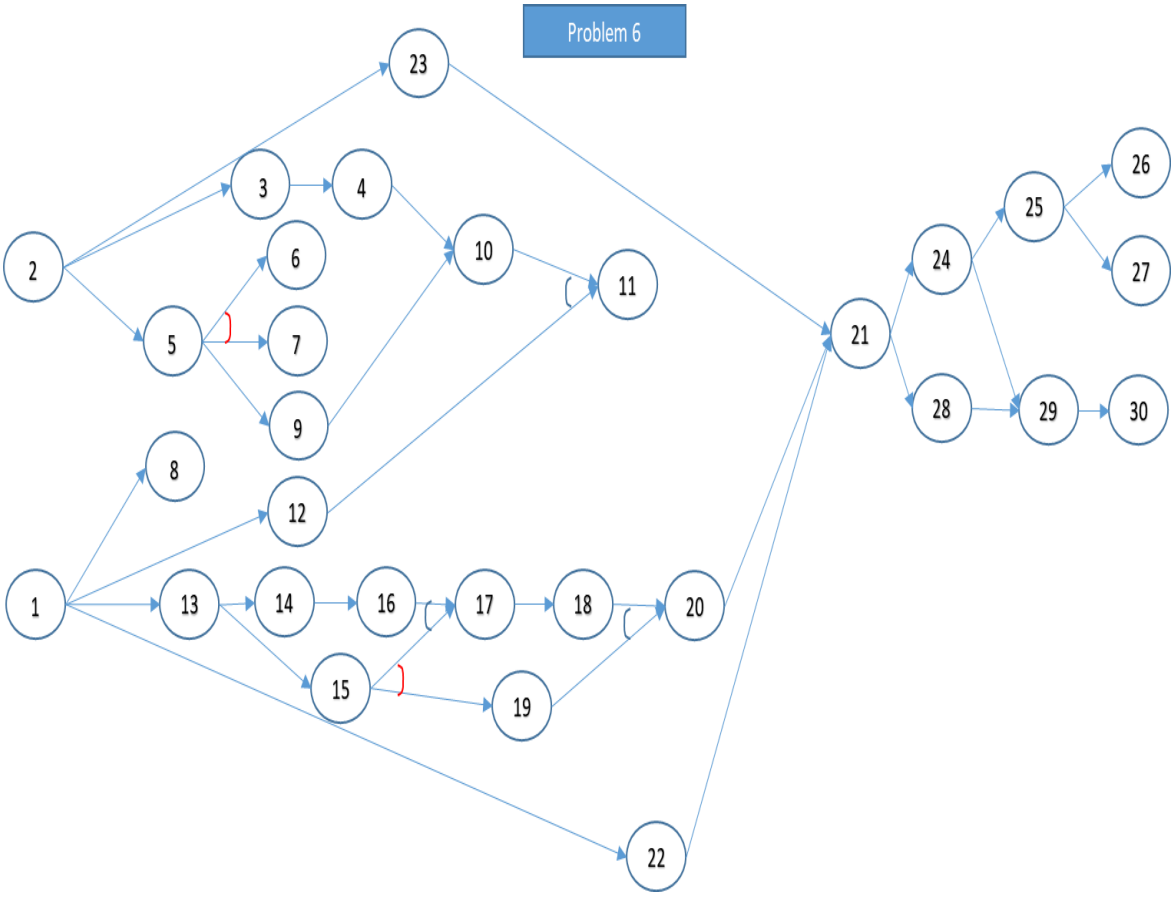
Şekil 3. Problem 3 öncelik diyagramı



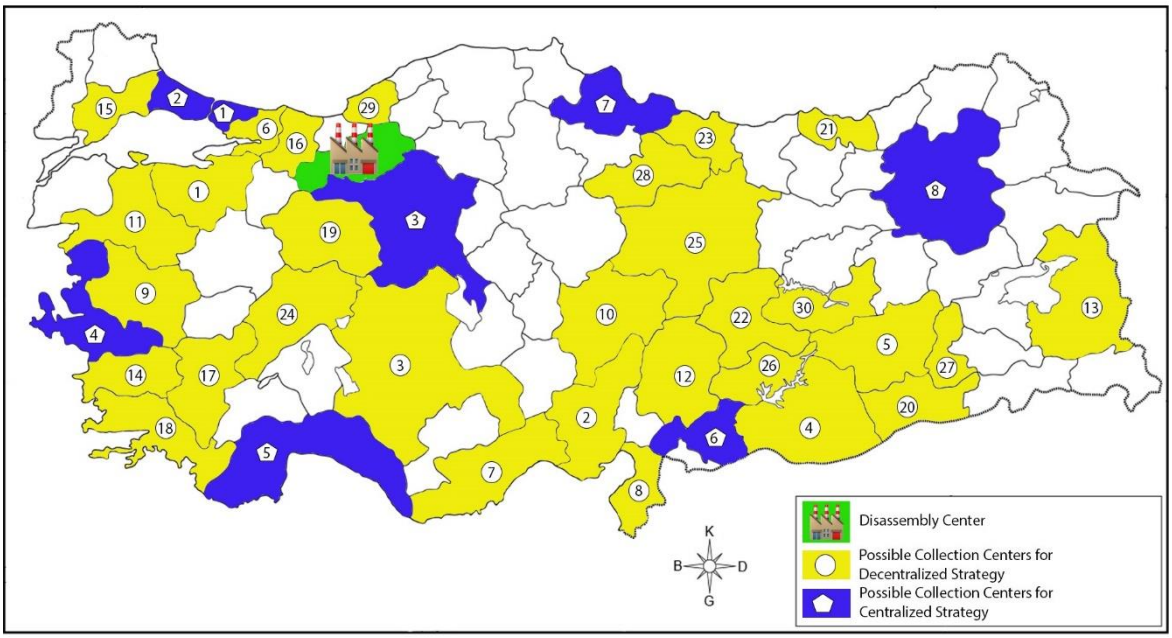
Şekil 4. Problem 4 öncelik diyagramı



Şekil 5. Problem 5 öncelik diyagramı



Şekil 6. Problem 6 öncelik diyagramı



Şekil 7. Toplama Merkezlerinin harita üzerinde görünümü

Bu çalışma kapsamında yaşam süresini doldurmuş ve geri dönüştürülecek olan ürünlerin toplanması amacıyla belirli bölgelerde toplama merkezleri açılacaktır. Açılması olası toplama merkezleri Şekil 7'de Türkiye haritası üzerinde gösterilmiştir.

Ara ve ana toplama merkezlerinin demontaj merkezine olan uzaklıkları, yol maliyetleri ve toplama merkezi açma maliyetleri Tablo 2 ve 3'te belirtilmiştir. Toplama Merkezi (TM) açma maliyetleri 2500 ile 6000 arasında olmak üzere düzgün dağılım ile belirlenmiştir.

Tablo 2. Ara toplama merkezleri

Demontaj merkezi: Bolu				
Sıra No	Ara Toplama Merkezleri	Bolu'ya Uzaklık (km)	Yol Maliyeti	TM Açma Maliyeti
1	Bursa	300	150	5300
2	Adana	666	333	4400
3	Konya	437	218.5	5600
4	Şanlıurfa	1020	510	4500
5	Diyarbakır	1178	589	2500
6	Kocaeli	180	90	5700
7	Mersin	674	337	5800
8	Hatay	832	416	2800
9	Manisa	667	333.5	5100
10	Kayseri	518	259	3200
11	Balıkesir	428	214	5800
12	Kahramanmaraş	770	385	5900
13	Van	1302	651	5800
14	Aydın	642	321	4500
15	Tekirdağ	446	223	5100
16	Sakarya	134	67	3400
17	Denizli	603	301.5	4200
18	Muğla	742	371	5100
19	Eskişehir	228	114	4100
20	Mardin	1220	610	4900
21	Trabzon	843	421.5	3700
22	Malatya	849	424.5	5000
23	Ordu	592	296	4700
24	Afyonkarahisar	407	203.5	4800
25	Sivas	618	309	3400
26	Adıyaman	894	447	4400
27	Batman	1295	647.5	3600
28	Tokat	523	261.5	2900
29	Zonguldak	127	63.5	5600
30	Elazığ	949	474.5	2700

Tablo 3. Ana toplama merkezleri

Demontaj merkezi: Bolu				
Sıra No	Ana Toplama Merkezleri	Bolu'ya Uzaklık (km)	Yol Maliyeti	TM Açma Maliyeti
1	İstanbul (Asya)	250	125	5500
2	İstanbul (Avrupa)	270	135	6000
3	Ankara	182	91	5000
4	İzmir	626	313	4500
5	Antalya	630	315	4000
6	Gaziantep	878	439	3000
7	Samsun	470	235	3500
8	Erzurum	966	483	2500

Tablo 4'te, bu çalışma kapsamında ele alınan altı farklı problem ve bu problemlerin parametreleri gösterilmektedir. Tabloda yer alan parametreler ve açıklamaları aşağıdaki gibidir:

1. Görev Sayısı: Her problem için yapılan görevlerin sayısını gösterir. Problemler, 5 ile 30 arasında değişen görev sayılarına sahiptir.

2. Parça Sayısı: Her problemde demontaj edilen parçaların sayısını gösterir. Problemler, 4 ile 24 parça arasında değişir.

3. VEYA öncelik ilişki sayısı: Problemlerdeki görevlerin VEYA öncelikli bağlantılarının sayısını gösterir. Bu bağlantılar, bir görevin başlamadan önce birden fazla görevin tamamlanması gerektiğini ifade eder.

4. VEYA ardıl ilişki sayısı: Problemlerdeki görevlerin VEYA ardıl bağlantılarının sayısını gösterir. Bu bağlantılar, bir görevin tamamlanmasının ardından birden fazla görevin başlayabileceğini ifade eder.

5. Görev Süreleri: Problemlerdeki görevlerin sürelerini gösterir. Görev süreleri, 40 ile 100 arasında düzgün dağılım (U[a,b]) ile belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, farklı görev sayıları, parça sayıları, öncelik ve ardıl ilişkileri ile sürelerin etkisi altında demontaj hattı dengeleme ve tersine tedarik zinciri problemi ele alınmaktadır. Bu problemler, gerçek dünyadaki demontaj süreçlerinde karşılaşılan zorlukları ve karmaşıklıkları temsil etmektedir. Çalışmanın amacı, bu parametrelerle farklı senaryoları

değerlendirerek, demontaj ve tedarik zinciri süreçlerini optimize etmek ve daha verimli hale getirmektir.

Tablo 4. Problem verileri

Problem	Görev Sayısı	Parça Sayısı	VEYA öncelik ilişki sayısı	VEYA ardıl ilişki sayısı	Görev Süreleri
Problem 1	5	4	1	1	U[40,100]
Problem 2	10	7	1	1	U[40,100]
Problem 3	15	12	2	1	U[40,100]
Problem 4	20	17	2	1	U[40,100]
Problem 5	25	20	2	2	U[40,100]
Problem 6	30	24	3	2	U[40,100]

4.2. Deney Tasarımı

Tablo 5'te altı farklı problem için deney tasarımı parametreleri gösterilmektedir. Problemler, iki seviyeli bir lojistik ağından (Seviye 1 ve Seviye 2) oluşmaktadır. Bu çalışmada ele alınan parametreler ve açıklamaları aşağıdaki gibidir:

1. Talep Miktarı (Dönem = Yıl): Her problemin her seviyesi için yıllık talep miktarını gösterir. Talep miktarı, seviye 1 için 80 ile 100 arasında ve seviye 2 için 100 ile 120 arasında düzgün dağılım (U[a,b]) ile belirlenmiştir.

2. Toplama Merkezi Kapasitesi: Her problemin her seviyesi için toplama merkezlerinin toplam kapasitesini gösterir. Seviye 1 için 10 ile 25 arasında ve seviye 2 için 25 ile 40 arasında düzgün dağılım ile belirlenmiştir.

3. Araç Kapasitesi (TRca): Her problemin her seviyesi için araç kapasitesini gösterir. Seviye 1 için 40 ile 70 arasında ve seviye 2 için 70 ile 100 arasında düzgün dağılım ile belirlenmiştir.

Problemler, farklı talep miktarları, toplama merkezi kapasiteleri ve araç kapasiteleri ile karşı karşıya kalan lojistik ağlarını temsil etmektedir. Bu çalışmada, bu parametrelerle farklı senaryoları değerlendirerek, lojistik ağın performansını ve maliyetlerini optimize etmek amaçlanmaktadır.

Tablo 5. Deney tasarımı parametreleri

Problem	Talep Miktarı (Dönem=Yıl)		Toplama Merkezi Kapasitesi		Araç Kapasitesi (TRca)	
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 1	Seviye 2
Problem 1	U[80,100]	U[100,120]	U[10,25]	U[25,40]	U[40,70]	U[70,100]
Problem 2	U[80,100]	U[100,120]	U[10,25]	U[25,40]	U[40,70]	U[70,100]
Problem 3	U[80,100]	U[100,120]	U[10,25]	U[25,40]	U[40,70]	U[70,100]
Problem 4	U[80,100]	U[100,120]	U[10,25]	U[25,40]	U[40,70]	U[70,100]
Problem 5	U[80,100]	U[100,120]	U[10,25]	U[25,40]	U[40,70]	U[70,100]
Problem 6	U[80,100]	U[100,120]	U[10,25]	U[25,40]	U[40,70]	U[70,100]

Tablo 6'da her bir problem için belirlenen parametre seviyelerine göre oluşturulan deney tasarımı gösterilmektedir. Tabloda görüldüğü gibi üç faktör için ikişer seviye belirlenmiş ve bu yolla her bir problem için 2^3=8 adet senaryo test edilmiştir. Dolayısıyla, altı problem için toplam 48 deney yapılmıştır.

Tablo 6. Deney tasarımı

Deney no	Talep	Top. Mer. Kapasitesi	Araç Kapasitesi
1	S1	S1	S1
2	S1	S1	S2
3	S1	S2	S1
4	S1	S2	S2
5	S2	S1	S1
6	S2	S1	S2
7	S2	S2	S1
8	S2	S2	S2

4.3. Merkezi Strateji Sonuçları

Önerilen modeli test etmek amacıyla altı farklı problemin farklı senaryoları için GAMS® yazılımı kullanılarak model kodlanmış ve CPLEX çözücüsüyle sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 7 ve 8'de altı farklı problem (P1-P6) için farklı senaryolara göre merkezi strateji sonuçları gösterilmektedir. Bu problemler, talep miktarı, toplama merkezi kapasitesi ve araç kapasitesi gibi parametrelerle tanımlanmıştır. Her problem için bu parametrelerin farklı kombinasyonlarını içeren senaryolar mevcuttur. Tablodaki sonuçlar üzerinden yapılan analizler şunlardır:

1. Amaç Fonksiyonu: Bu değer, her senaryo için optimize edilmeye çalışılan toplam maliyeti temsil eder. Genel olarak, talep miktarı ve araç kapasitesi arttıkça amaç fonksiyonu değeri de artmaktadır. Bu durum, daha fazla talep ve daha büyük araç kapasiteleriyle lojistik süreçlerin daha maliyetli olduğunu göstermektedir.
2. Koşum süresi (sn): Çözüm süresi için kullanılan işlemci zamanını gösterir. Koşum süresi, problem boyutu arttıkça (örneğin P1'den P6'ya) genel olarak artmaktadır. Bu durum, daha karmaşık problemlerin çözülmesinin daha fazla hesaplama gücü ve zaman gerektirdiğini gösterir.

Tablo 7. Merkezi strateji sonuçları (P1-P4)

Problem	Talep	Top. Mer. Kap.	Araç Kap.	Amaç F.	Koşum sü. (sn)
P1	U[80,100]	U[10,25]	U[40,70]	41782	10
	U[80,100]	U[10,25]	U[70,100]	46517	11
	U[80,100]	U[25,40]	U[40,70]	34922	11
	U[80,100]	U[25,40]	U[70,100]	32827	12
	U[100,120]	U[10,25]	U[40,70]	52706	14
	U[100,120]	U[10,25]	U[70,100]	49111	12
	U[100,120]	U[25,40]	U[40,70]	37578	10
	U[100,120]	U[25,40]	U[70,100]	39652	11
P2	U[80,100]	U[10,25]	U[40,70]	39200	16
	U[80,100]	U[10,25]	U[70,100]	41902	14
	U[80,100]	U[25,40]	U[40,70]	32232	13
	U[80,100]	U[25,40]	U[70,100]	31437	14
	U[100,120]	U[10,25]	U[40,70]	56186	22
	U[100,120]	U[10,25]	U[70,100]	59096	17
	U[100,120]	U[25,40]	U[40,70]	40857	24
	U[100,120]	U[25,40]	U[70,100]	41067	26
P3	U[80,100]	U[10,25]	U[40,70]	47165	22
	U[80,100]	U[10,25]	U[70,100]	52256	26
	U[80,100]	U[25,40]	U[40,70]	38037	28
	U[80,100]	U[25,40]	U[70,100]	38037	25
	U[100,120]	U[10,25]	U[40,70]	54167	39
	U[100,120]	U[10,25]	U[70,100]	69761	44
	U[100,120]	U[25,40]	U[40,70]	48430	52
	U[100,120]	U[25,40]	U[70,100]	46882	51
P4	U[80,100]	U[10,25]	U[40,70]	50377	157
	U[80,100]	U[10,25]	U[70,100]	49580	144
	U[80,100]	U[25,40]	U[40,70]	36735	183
	U[80,100]	U[25,40]	U[70,100]	38252	153
	U[100,120]	U[10,25]	U[40,70]	56783	185
	U[100,120]	U[10,25]	U[70,100]	60591	184
	U[100,120]	U[25,40]	U[40,70]	44472	223
	U[100,120]	U[25,40]	U[70,100]	45272	206

Tablo 8. Merkezi strateji sonuçları (P5 ve P6)

Problem	Talep	Top. Mer. Kap.	Araç Kap.	Amaç F.	Koşum sü. (sn)
P5	U[80,100]	U[10,25]	U[40,70]	63361	239
	U[80,100]	U[10,25]	U[70,100]	76491	219
	U[80,100]	U[25,40]	U[40,70]	54847	286
	U[80,100]	U[25,40]	U[70,100]	55032	282
	U[100,120]	U[10,25]	U[40,70]	79788	226
	U[100,120]	U[10,25]	U[70,100]	82900	197
	U[100,120]	U[25,40]	U[40,70]	72365	277
	U[100,120]	U[25,40]	U[70,100]	68672	289
P6	U[80,100]	U[10,25]	U[40,70]	225258	98
	U[80,100]	U[10,25]	U[70,100]	222258	87
	U[80,100]	U[25,40]	U[40,70]	222258	92
	U[80,100]	U[25,40]	U[70,100]	216930	84
	U[100,120]	U[10,25]	U[40,70]	268201	93
	U[100,120]	U[10,25]	U[70,100]	256462	95
	U[100,120]	U[25,40]	U[40,70]	288839	90
	U[100,120]	U[25,40]	U[70,100]	261297	114

4.4. Merkezi Olmayan Strateji Sonuçları

Önerilen modeli merkezi olmayan stratejiye göre test etmek amacıyla problemler GAMS® yazılımı kullanılarak kodlanmış ve CPLEX çözücüsüyle sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 9 ve 10'da altı farklı problem (P1-P6) için farklı senaryolara göre merkezi strateji sonuçları gösterilmektedir. Bu problemler, talep miktarı, toplama merkezi kapasitesi ve araç kapasitesi gibi parametrelerle tanımlanmıştır. Tablodaki sonuçlar üzerinden yapılan analizler şunlardır:

1. Talep: Talep arttıkça, genellikle amaç fonksiyonu değeri de artmaktadır. Bu durum, talebin karşılanması için daha fazla kaynak kullanılmasını gerektirdiğinden ve böylece maliyetlerin arttığından kaynaklanmaktadır.
2. Toplam Merkez Kapasitesi: Toplama Merkezinin Kapasitesinin artması, genellikle amaç fonksiyonu değerinin düşmesine veya aynı kalmasına neden olmaktadır. Bu durum, daha yüksek kapasiteli merkezlerin, talepleri daha etkili ve verimli bir şekilde karşılayabildiğinden kaynaklanmaktadır.
3. Araç Kapasitesi: Araç kapasitesi arttıkça, amaç fonksiyonu değeri genellikle düşmektedir. Daha yüksek kapasiteli araçlar, daha az sefer yaparak aynı talebi karşılayabilmekte ve bu da maliyetlerin düşmesine neden olmaktadır.

4. Koşum Süresi: Koşum süreleri, problemler ve senaryolar arasında önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu durum, problem büyüklüğü, karmaşıklık ve kullanılan yöntemlerle ilgili olabilir.

Tablo 9. Merkezi olmayan strateji sonuçları (P1-P4)

Problem	Talep	Top. Mer. Kap.	Araç Kap.	Amaç F.	Koşum sü. (sn)
P1	U[80,100]	U[10,25]	U[40,70]	37891	12
	U[80,100]	U[10,25]	U[70,100]	38377	13
	U[80,100]	U[25,40]	U[40,70]	31574	13
	U[80,100]	U[25,40]	U[70,100]	30544	12
	U[100,120]	U[10,25]	U[40,70]	32425	13
	U[100,120]	U[10,25]	U[70,100]	30095	13
	U[100,120]	U[25,40]	U[40,70]	37330	13
	U[100,120]	U[25,40]	U[70,100]	38492	14
P2	U[80,100]	U[10,25]	U[40,70]	38641	17
	U[80,100]	U[10,25]	U[70,100]	37489	19
	U[80,100]	U[25,40]	U[40,70]	37574	17
	U[80,100]	U[25,40]	U[70,100]	41441	16
	U[100,120]	U[10,25]	U[40,70]	47250	17
	U[100,120]	U[10,25]	U[70,100]	43970	22
	U[100,120]	U[25,40]	U[40,70]	46755	15
	U[100,120]	U[25,40]	U[70,100]	38641	18
P3	U[80,100]	U[10,25]	U[40,70]	55427	43
	U[80,100]	U[10,25]	U[70,100]	54267	32
	U[80,100]	U[25,40]	U[40,70]	36934	52
	U[80,100]	U[25,40]	U[70,100]	36315	44
	U[100,120]	U[10,25]	U[40,70]	54887	38
	U[100,120]	U[10,25]	U[70,100]	55319	33
	U[100,120]	U[25,40]	U[40,70]	41512	54
	U[100,120]	U[25,40]	U[70,100]	40864	53
P4	U[80,100]	U[10,25]	U[40,70]	44853	146
	U[80,100]	U[10,25]	U[70,100]	43851	134
	U[80,100]	U[25,40]	U[40,70]	37617	132
	U[80,100]	U[25,40]	U[70,100]	35161	160
	U[100,120]	U[10,25]	U[40,70]	50114	119
	U[100,120]	U[10,25]	U[70,100]	51587	115
	U[100,120]	U[25,40]	U[40,70]	42436	237
	U[100,120]	U[25,40]	U[70,100]	42241	162

Tablo 10. Merkezi olmayan strateji sonuçları (P5 ve P6)

Problem	Talep	Top. Mer. Kap.	Araç Kap.	Amaç F.	Koşum sü. (sn)
P5	U[80,100]	U[10,25]	U[40,70]	65012	310
	U[80,100]	U[10,25]	U[70,100]	63851	322
	U[80,100]	U[25,40]	U[40,70]	61179	279
	U[80,100]	U[25,40]	U[70,100]	53166	342
	U[100,120]	U[10,25]	U[40,70]	76928	295
	U[100,120]	U[10,25]	U[70,100]	72183	275
	U[100,120]	U[25,40]	U[40,70]	67841	332
	U[100,120]	U[25,40]	U[70,100]	65391	231
P6	U[80,100]	U[10,25]	U[40,70]	219661	119
	U[80,100]	U[10,25]	U[70,100]	225715	252
	U[80,100]	U[25,40]	U[40,70]	213520	234
	U[80,100]	U[25,40]	U[70,100]	207961	283
	U[100,120]	U[10,25]	U[40,70]	290318	185
	U[100,120]	U[10,25]	U[70,100]	286408	312
	U[100,120]	U[25,40]	U[40,70]	270525	144
	U[100,120]	U[25,40]	U[70,100]	272219	335

Problemler ve senaryolar arasındaki farklılıklara göre yapılan analizin sonuçları ise şunlardır:

Talep ve kapasite etkileşimi: Talep ve kapasiteler arasındaki etkileşimi incelediğimizde, her problem için Toplama Merkezi Kapasitesi ve Araç Kapasitesi değerlerinin artmasıyla amaç fonksiyonu değerlerinde genel bir düşüş eğilimi olduğunu görüyoruz. Bu, daha yüksek kapasiteli merkezler ve araçlar sayesinde, taleplerin daha verimli bir şekilde karşılanabildiğini gösterir.

Problem karşılaştırması: P1 ve P2 problemleri arasında, P2'nin amaç fonksiyonu değerleri daha yüksek olduğunu ve çözüm sürelerinin genellikle daha uzun olduğunu gözlemleyebiliriz. Bu, P2 probleminin P1'e göre daha karmaşık olduğunu ve daha fazla zaman ve kaynak gerektirdiğini düşündürebilir.

Çözüm süreleri: Problemler arasında çözüm süreleri önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Özellikle, P6 problemi diğer problemlere göre daha uzun çözüm sürelerine sahiptir. Bu, P6'nın daha karmaşık ve zorlu bir problem olduğunu düşündürebilir. Aynı şekilde, P5 problemi de diğer problemlerden daha uzun çözüm sürelerine sahiptir, ancak P6 kadar yüksek değildir.

En iyi ve en kötü Senaryolar: Her problem için en düşük ve en yüksek amaç fonksiyonu değerlerini karşılaştırdığımızda, talep ve kapasite değerlerinin belirli kombinasyonlarının daha iyi sonuçlar verdiğini görebiliriz. Örneğin, P1 için en düşük amaç fonksiyonu değeri, U[100,120] talep, U[25,40] Toplama Merkezi Kapasitesi ve U[70,100] Araç Kapasitesi kombinasyonunda elde edilirken, en yüksek değer U[80,100] talep, U[10,25] Toplama Merkezi Kapasitesi ve U[40,70] Araç Kapasitesi kombinasyonunda elde edilmiştir.

Toplam Merkez Kapasitesi ve Araç Kapasitesi İlişkisi: Toplama Merkezi Kapasitesi ve Araç Kapasitesi değerlerinin birlikte arttığı senaryolarda, amaç fonksiyonu değerlerinde daha büyük düşüşler gözlenmektedir. Bu, her iki kapasite türünün birlikte arttığında, tersine tedarik zinciri süreçlerinin daha düşük maliyetlerle yürütülebildiğini gösterir.

4.5. Varyans Analizi

Merkezi ve merkezi olmayan stratejiler için altı problem ve bunların farklı senaryoları için elde edilen sonuçlar varyans analizi yapılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, her iki strateji karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Tablo 11 ve 12'de merkezi strateji için elde edilen sonuçların amaç fonksiyonu ve koşum süreleri bakımından varyans analizi sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 11. Merkezi stratejiye göre amaç fonksiyonu için ANOVA sonuçları

Kaynak	**SS**	**df**	**MS**	**F istatistiği**	**p-değeri**
Gruplar	1.53E+11	5	3.06E+10	1860.74	<0.001
Hata	1.29E+09	42	3.08E+07		
Toplam	1.54E+11	47			

Tablo 12. Merkezi stratejiye göre koşum süresi için ANOVA sonuçları

Kaynak	**SS**	**df**	**MS**	**F istatistiği**	**p-değeri**
Gruplar	2445304	5	489060	397.12	<0.001
Hata	51624	42	1229		
Toplam	2496928	47			

Amaç fonksiyonu için ANOVA tablosu, Gruplar (problemler P1-P6) arasında büyük bir açıklanan varyans olduğunu (SS: 1.53E+11) ve F istatistiğinin oldukça yüksek olduğunu (1860.74) göstermektedir. Bu, problemler arasında amaç fonksiyonu değerlerinde anlamlı farklılıklar olduğunu doğrular.

Koşum süreleri için ANOVA tablosu da benzer şekilde, Gruplar arasında büyük bir açıklanan varyans olduğunu (SS: 2445304) ve yüksek bir F istatistiği değeri (397.12) göstermektedir. Bu da problemler arasında koşum sürelerinde anlamlı farklılıklar olduğunu doğrular.

Her iki durumda da p-değerinin 0.001'den küçük olduğunu göz önünde bulundurarak, problemler arasında hem amaç fonksiyonu değerlerinde hem de koşum sürelerinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğunu söylenebilir. Bu sonuçlar, farklı problemler ve senaryolar arasındaki performansın önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir.

Tablo 13. Merkezi stratejiye göre MANOVA sonuçları

Kaynak	**SS Amaç Fonk.**	**SS Koşum Süresi**	**df**	**F istatistiği**	**p-değeri**
Talep	6.40E+10	1013464	1	395.23	<0.001
Top. Mer. Kap.	2.95E+10	783772	1	234.96	<0.001
Araç Kapasitesi	1.31E+10	386920	1	116.28	<0.001
Hata	1.29E+09	51624	42		
Toplam	1.54E+11	2496928	47		

Tablo 13’te merkezi stratejiye göre MANOVA sonuçları verilmektedir. MANOVA tablosu, bağımsız değişkenlerin (Talep, Toplama Merkezi Kapasitesi ve Araç Kapasitesi) hem amaç fonksiyonu hem de koşum süresi üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Tüm bağımsız değişkenler için F istatistikleri yüksektir ve p-değerleri 0.001'den düşüktür.

Sonuç olarak, talep, toplama merkezi kapasitesi ve araç kapasitesi gibi faktörlerin hem amaç fonksiyonu değerleri hem de koşum süreleri üzerinde anlamlı etkileri olduğu görülmektedir. Bu sonuç, her problemin ve senaryonun performansının önemli ölçüde farklı olduğunu gösterir ve bu faktörlerin modelleme ve optimizasyon süreçlerinde dikkate alınması gerektiğini vurgular.

Tablo 14. Merkezi olmayan stratejiye göre MANOVA sonuçları

Kaynak	SS Amaç Fonk.	SS Koşum Süresi	df	F istatistiği	p-değeri
Talep	1.15E+11	2443410	1	783.28	<0.001
Top. Mer. Kap.	4.03E+10	1346647	1	273.63	<0.001
Araç Kapasitesi	1.96E+10	638133	1	132.89	<0.001
Hata	2.45E+10	334325	35		
Toplam	4.92E+11	9917809	47		

Tablo 14’te merkezi olmayan stratejiye göre MANOVA sonuçları verilmektedir. MANOVA tablosu, merkezi stratejide olduğu gibi parametrelerin hem amaç fonksiyonu hem de koşum süresi üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Tüm bağımsız değişkenler için F istatistikleri yüksektir ve p-değerleri 0.001'den düşüktür. Sonuç olarak, bu analiz, problem türü, talep, toplama merkezi kapasitesi ve araç kapasitesi gibi faktörlerin hem amaç fonksiyonu değerleri hem de koşum süreleri üzerinde anlamlı etkileri olduğunu göstermektedir.

4.6. Karşılaştırmalı Analiz

Bu bölümde, merkezi ve merkezi olmayan stratejilere göre Tablo 13 ve 14’te gösterilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, Şekil 8 ve 9’da iki strateji için sonuçlar amaç fonksiyonu ve koşum süresi bakımından 3d grafik aracılığıyla gösterilmiştir. Her bir problem için iki strateji birlikte değerlendirildiğinde elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir:

Problem P1 için:

- En yüksek amaç fonksiyonu değeri, Talep U[80,100], Toplama Merkezi Kapasitesi U[10,25] ve Araç Kapasitesi U[40,70] olduğunda 41782'dir ve koşum süresi 10 saniyedir.
- En düşük amaç fonksiyonu değeri, Talep U[100,120], Toplama Merkezi Kapasitesi U[10,25] ve Araç Kapasitesi U[70,100] olduğunda 30095'tir ve koşum süresi 13 saniyedir.

Problem P2 için:

- En yüksek amaç fonksiyonu değeri, Talep U[100,120], Toplama Merkezi Kapasitesi U[10,25] ve Araç Kapasitesi U[40,70] olduğunda 56186'dır ve koşum süresi 22 saniyedir.
- En düşük amaç fonksiyonu değeri, Talep U[80,100], Toplama Merkezi Kapasitesi U[25,40] ve Araç Kapasitesi U[40,70] olduğunda 32232'dir ve koşum süresi 13 saniyedir.

Problem P3 için:

- En yüksek amaç fonksiyonu değeri, Talep U[100,120], Toplama Merkezi Kapasitesi U[10,25] ve Araç Kapasitesi U[70,100] olduğunda 69761'dir ve koşum süresi 44 saniyedir.
- En düşük amaç fonksiyonu değeri, Talep U[80,100], Toplama Merkezi Kapasitesi U[25,40] ve Araç Kapasitesi U[70,100] olduğunda 36315'tir ve koşum süresi 44 saniyedir.

Problem P4 için:

- En yüksek amaç fonksiyonu değeri, Talep U[100,120], Toplama Merkezi Kapasitesi U[10,25] ve Araç Kapasitesi U[40,70] olduğunda 56783'dür ve koşum süresi 185 saniyedir.
- En düşük amaç fonksiyonu değeri, Talep U[80,100], Toplama Merkezi Kapasitesi U[25,40] ve Araç Kapasitesi U[70,100] olduğunda 35161'dir ve koşum süresi 160 saniyedir.

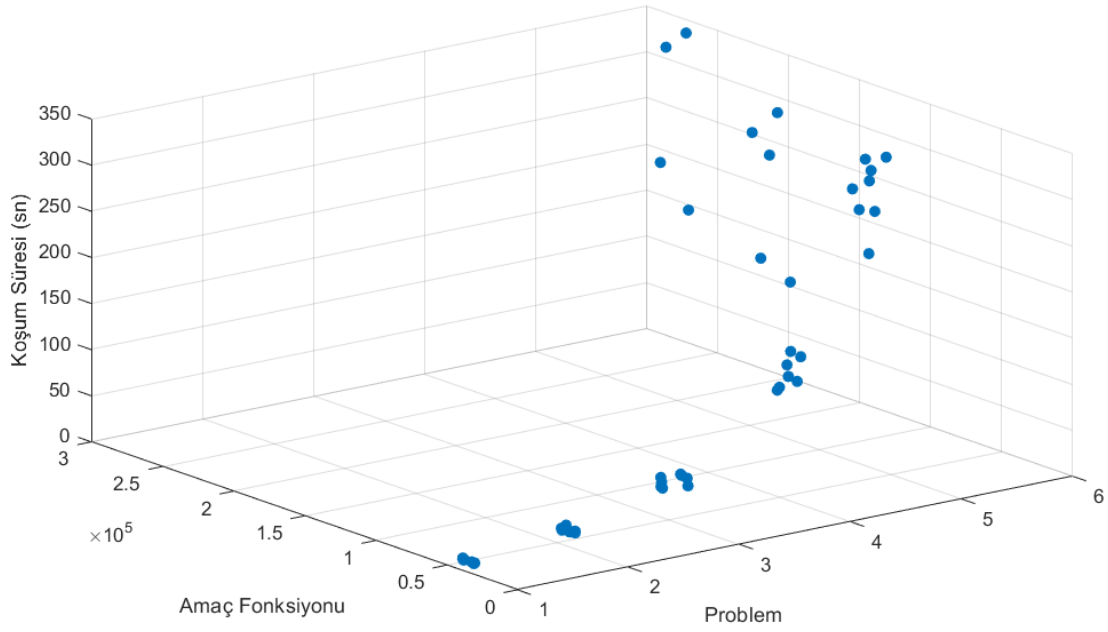
Problem P5 için:

- En yüksek amaç fonksiyonu değeri, Talep U[100,120], Toplama Merkezi Kapasitesi U[10,25] ve Araç Kapasitesi U[70,100] olduğunda 82900'dür ve koşum süresi 197 saniyedir.
- En düşük amaç fonksiyonu değeri, Talep U[80,100], Toplama Merkezi Kapasitesi U[25,40] ve Araç Kapasitesi U[70,100] olduğunda 53166'dır ve koşum süresi 342 saniyedir.

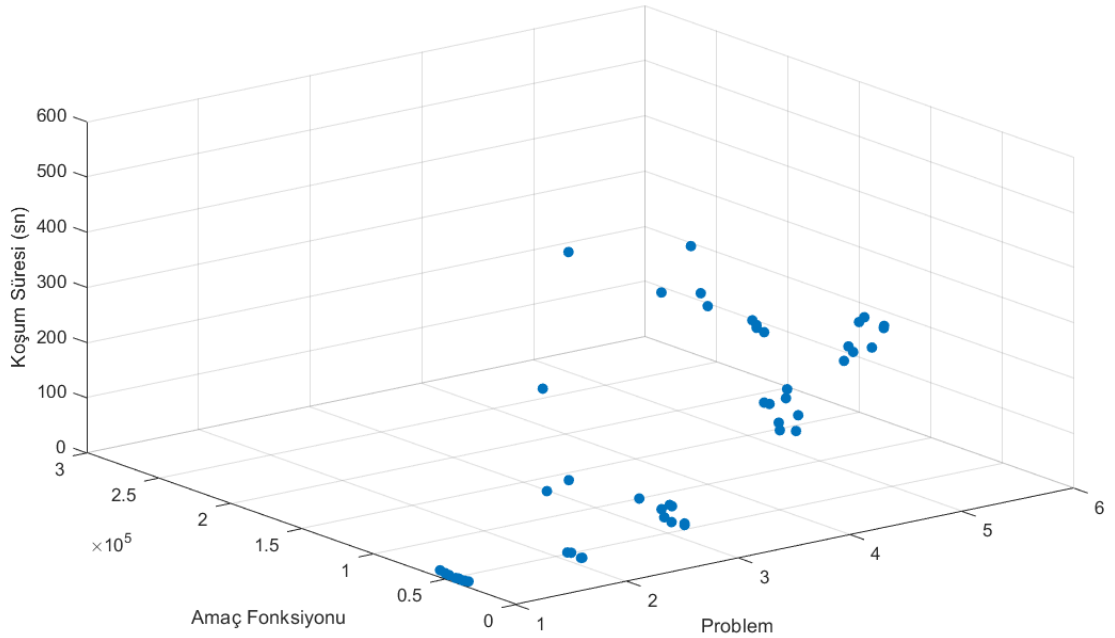
Problem P6 için:

- En yüksek amaç fonksiyonu değeri, Talep U[100,120], Toplama Merkezi Kapasitesi U[10,25] ve Araç Kapasitesi U[40,70] olduğunda 290318'dir ve koşum süresi 185 saniyedir.

- En düşük amaç fonksiyonu değeri, Talep U[80,100], Toplama Merkezi Kapasitesi U[25,40] ve Araç Kapasitesi U[70,100] olduğunda 195291'dir ve koşum süresi 160 saniyedir.



Şekil 8. Merkezi strateji için genel karşılaştırma



Şekil 9. Merkezi olmayan strateji için genel karşılaştırma

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tersine tedarik zinciri, kullanılan veya atık haline gelmiş ürünlerin geri kazanılması, işlenmesi ve yeniden değere kavuşturulması süreçlerini kapsarken, demontaj hattı dengeleme problemi bu işlemleri daha etkili ve uygun hale getirmeyi hedeflemektedir. Optimize edilen bir demontaj hattı, tersine tedarik zinciri süreçlerinin daha düşük maliyetle gerçekleştirilmesine, atık miktarının azalmasına ve kaynakların etkili bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunur. Bu tez, sürdürülebilir üretim ve tüketim süreçlerinin önemini vurgulayarak geri dönüşüm süreçlerinin optimizasyonuna yoğunlaşmaktadır.

Bu çalışmada, birbirine bağlantılı olan çok insanlı demontaj hattı dengeleme problemi, parti büyüklüğü belirleme problemi ve tersine tedarik zinciri planlaması problemi entegre olarak ele alınmıştır. Böylece, kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerin geri dönüşüm ve yeniden değerlendirme süreçlerinin optimize edilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmada, bu üç problemin entegrasyonu sağlanarak stratejik düzeyde tersine tedarik zinciri kararları ile taktik düzeydeki demontaj hattı dengeleme problemleri arasındaki ilişki derinlemesine incelenmiştir. Bu problem için bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmiş ve deneysel verilerle problemler test edilmiştir. Ayrıca, merkezi ve merkezi olmayan tersine tedarik zinciri tasarım stratejilerinin sonuçlar üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Sonuç olarak, bu tez çalışması sürdürülebilir üretim ve tüketim süreçlerinin geliştirilmesinde hem akademik hem de uygulamaya yönelik alanlarda önemli bir katkı sunmaktadır. Aynı zamanda, endüstri uygulayıcıları için stratejik ve taktik kararlarla ilgili değerli temel bulgular ve yönetimsel öneriler sunmaktadır.

Bu çalışmada önerilen model farklı problemlerin farklı senaryoları için deneysel verilerle test edilmiştir. Ayrıca, merkezi ve merkezi olmayan tersine tedarik zinciri olmak üzere iki farklı tasarım stratejisi uygulanmıştır. Sonuçlara göre, merkezi olmayan strateji uygulandığında amaç fonksiyonu bakımından genel olarak daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Koşum süresi incelendiğinde problem boyutu arttıkça (örneğin P1'den P6'ya) sürenin genel olarak arttığı görülmektedir. Bu durum, daha karmaşık problemlerin çözülmesinin daha fazla hesaplama gücü ve zaman gerektirdiğini gösterir. Bununla birlikte, merkezi strateji uygulandığında koşum sürelerinin genel olarak daha az olduğu yani daha hızlı çözüm elde edilebildiği görülmüştür.

Talep, toplama merkezi kapasitesi ve araç kapasitesi parametrelerinin her biri için iki seviye belirlenerek deney tasarımı gerçekleştirilmiş ve varyans analizi yapılmıştır. İstatistiksel analiz sonuçlarına göre, toplama merkezi kapasitesi ve araç kapasitesi arttıkça amaç fonksiyonunda iyileşme olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, toplama merkezi kapasitesi ve araç kapasitesi değerlerinin birlikte arttığı senaryolarda, amaç fonksiyonu değerlerinde daha büyük düşüşler gözlenmektedir. Bu, her iki kapasite türünün birlikte arttığında, tersine tedarik zinciri süreçlerinin daha düşük maliyetlerle yürütülebildiğini göstermektedir. Daha fazla talep ve daha büyük araç kapasiteleri durumunda ise lojistik süreçlerin daha maliyetli olduğu görülmektedir.

Gelecek çalışmalarda, daha etkili ve çevre dostu geri dönüşüm teknolojileri ve demontaj yöntemlerinin keşfi, keşfi ve entegrasyonu üzerine odaklanabilir. Ayrıca, sürdürülebilirlik performans göstergeleri geliştirerek geri dönüşüm süreçlerinin etkinliğini ölçmeye yönelik çalışmalar yapılabilir. Makine öğrenimi ve yapay zeka yöntemlerinin kullanımının araştırılması, daha etkili optimizasyon stratejileri geliştirmeye olanak sağlayabilir. Ayrıca, daha kapsamlı ve esnek bir modelleme yaklaşımının geliştirilmesi, geri dönüşüm süreçlerinin ve tersine tedarik zinciri kararlarının daha geniş bir yelpazede analiz edilmesine olanak tanır. Son olarak, gerçek dünya uygulamaları ve vaka çalışmaları üzerine odaklanarak, teorik bulguların pratikte nasıl uygulanabileceğini daha iyi anlamamıza yardımcı olacak çalışmalar yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

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.

Altekin, F. T., Kandiller, L., & Ozdemirel, N. E. (2008). Profit-oriented disassembly-line balancing. *International Journal of Production Research*, *46*(10), 2675-2693.

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

Bentaha, M. L., Battaïa, O., & Dolgui, A. (2014). A sample average approximation method for disassembly line balancing problem under uncertainty. *Computers & Operations Research*, *51*, 111-122.

Cevikcan, E., Aslan, D., & Yeni, F. B. (2020). Disassembly line design with multi-manned workstations: a novel heuristic optimisation approach. *International Journal of Production Research*, *58*(3), 649–670.

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. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *48*.

Diri Kenger, Z., Koç, Ç., & Özceylan, E. (2020). Integrated disassembly line balancing and routing problem. *International Journal of Production Research*, 58(23), 7250-7268.

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.

Habibi, M. K. K., Battaïa, O., Cung, V. D., & Dolgui, A. (2014). Integrated procurement–disassembly problem. In *Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2014, Ajaccio, France, September 20-24, 2014, Proceedings, Part II* (pp. 482-490). Springer Berlin Heidelberg.

Habibi, M. K., Battaïa, O., Cung, V. D., & Dolgui, A. (2017). Collection-disassembly problem in reverse supply chain. *International Journal of Production Economics*, *183*, 334-344.

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.

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*, 353-376.

Li, Z., Çil, Z. A., Mete, S., & Kucukkoc, I. (2020). A fast branch, bound and remember algorithm for disassembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, *58*(11), 3220-3234.Liu, H., Lei, M., Deng, H., Leong, G. K., & Huang, T. (2016). A dual channel, quality-based price competition model for the WEEE recycling market with government subsidy. *Omega*, *59*, 290-302.

Liu, M., Liu, X., Chu, F., Zheng, F., & Chu, C. (2020). Robust disassembly line balancing with ambiguous task processing times. *International Journal of Production Research*, *58*(19), 5806-5835.

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.

Özceylan, E., & Paksoy, T. (2013). Reverse supply chain optimisation with disassembly line balancing. *International Journal of Production Research*, *51*(20), 5985-6001.

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.

Pour-Massahian-Tafti, M., Godichaud, M., & Amodeo, L. (2020). New models and efficient methods for single-product disassembly lot-sizing problem with surplus inventory decisions. *International Journal of Production Research*, 1-21.

Slama, I., Ben-Ammar, O., Dolgui, A., & Masmoudi, F. (2021). Genetic algorithm and Monte Carlo simulation for a stochastic capacitated disassembly lot-sizing problem under random lead times. *Computers & Industrial Engineering*, 107468.

Yılmaz, Ö. F., & Yazıcı, B. (2021). Tactical level strategies for multi-objective disassembly line balancing problem with multi-manned stations: an optimization model and solution approaches. *Annals of Operations Research*, 1-51.

ÖZGEÇMİŞ

Elif ÖKSÜZ, 2007 yılında Halil Çiftçi Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2008 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı ve 2012 yılında lisans eğitimini tamamladı. 2014-2019 yılları arasında İstanbul'daki bir tekstil firmasında Üretim Planlama Mühendisi olarak çalıştı. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalında tezli yüksek lisans eğitimine başladı ve Mayıs 2023 tarihinde tez çalışmasını tamamlayarak Endüstri Yüksek Mühendisi unvanını aldı.