

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**HETEROJEN EŞ ZAMANLI TOPLA DAĞIT ARAÇ ROTALAMA
PROBLEMİ: FİRMA İÇİ MALZEME TAŞIMA SİSTEMİ
UYGULAMASI**

HAZIRLAYAN

ELİF TÜRKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA-2022

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**HETEROJEN EŞ ZAMANLI TOPLA DAĞIT ARAÇ ROTALAMA
PROBLEMİ: FİRMA İÇİ MALZEME TAŞIMA SİSTEMİ
UYGULAMASI**

HAZIRLAYAN

ELİF TÜRKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ TUSAN DERYA

ANKARA-2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Elif Türker tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 11/08/2022

Tez Adı: Heterojen Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi: Firma İçi Malzeme Taşıma Sistemi Uygulaması

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı-Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ

.....

Doç. Dr. Uğur BAÇ

.....

Dr. Öğr. Üyesi Tusan DERYA

.....

ONAY

Prof. Dr. Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMA ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 25/08/2022

Öğrencinin Adı, Soyadı: Elif Türker

Öğrencinin Numarası: 21910390

Anabilim Dalı: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı: Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Tusan Derya

Tez Başlığı: Heterojen Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi: Firma İçi Malzeme Taşıma Sistemi Uygulaması

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 41 sayfalık kısmına ilişkin, 25/ 08 /2022 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olunan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 8'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

"Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını" inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarında tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

Tarih: 25/08/2022

Öğrenci Danışmanı Unvan, Adı, Soyadı, İmza:

Dr. Öğr. Üyesi Tusan DERYA

ÖZET

Elif TÜRKER

HETEROJEN EŞ ZAMANLI TOPLA DAĞIT ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ: FİRMA İÇİ MALZEME TAŞIMA SİSTEMİ UYGULAMASI

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

2022

Günümüzde firmalar artan maliyetlerini azaltmak amacı ile geri dönüşüm faaliyetlerine önem göstermektedir. Firmaların maliyetlerini azaltmak ve ekonomik getiri elde etmek amacı ile geri dönüşüm faaliyetlerine ağırlık vermeleri, lojistik sektörünü de etkilemektedir. Son yıllarda lojistik sektöründe yapılan ürün dağıtımlarına ek olarak, müşterilerden ürünlerin geri toplanması da söz konusudur. Müşterilerden toplanan ürünlerin yeniden işlenerek tekrar değerlendirilmesi, lojistik firmalarının da ağırlarını en etkin şekilde kullanmalarını zorunlu hale getirmektedir. Müşterilerin bulunduğu lokasyonlarda toplama ve dağıtım işlemlerinin eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesi hem araçların daha verimli kullanılması hem de maliyet açısından fayda sağlamaktadır. Gerçek hayat problemlerinde gerçekleştirilen bu dağıtım ve toplama işlemlerinde kapasite, hız, uygunluk gibi farklı özelliklere sahip araçların bulunduğu heterojen filo kullanımı söz konusu olabilmektedir. Bu tez kapsamında Heterojen Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi'nin gerçek hayat uygulaması ele alınmaktadır. Problem çözümünde Tavlama Benzetimi Algoritması kullanılarak elde edilen rotaların tez çalışmasının gerçekleştirildiği firmadaki taşıma süreçlerine katkısı değerlendirilmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Araç Rotalama Problemi, Heterojen Filo, Eş Zamanlı Topla Dağıt, Tavlama Benzetimi Algoritması

ABSTRACT

Elif TÜRKER

A SIMULTANEOUS DELIVERY AND PICK-UP HETEROGENEOUS VEHICLE ROUTING PROBLEM: APPLICATION OF IN-HOUSE MATERIAL HANDLING SYSTEM

Başkent University Institute of Science

Industrial Engineering Department

2022

Today, companies attach importance to recycling activities in order to reduce their increasing costs. The fact that companies focus on recycling activities in order to reduce their costs and obtain economic returns also affects the logistics sector. In addition to the product distributions made in the logistics sector in recent years, there is also the collection of products from customers. Re-processing and re-evaluating the products collected from customers makes it mandatory for logistics companies to use their networks in the most effective way. The simultaneous execution of collection and distribution operations at customer locations provides benefits in terms of both more efficient use of vehicles and cost. In these distribution and collection processes, which are carried out in real life problems, heterogeneous fleets with vehicles with different characteristics such as capacity, speed and suitability can be used. In this thesis, the real life application of Heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery problem is discussed. The contribution of the routes obtained by using the Annealing Simulation Algorithm to the transportation processes in the company where the thesis study is carried out is evaluated.

KEYWORDS: Vehicle Routing Problem, Heterogenous Fleet, Simultaneously Delivery and Pick-up, Simulated Annealing Algorithm.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
TABLolar LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. HETEROJEN EŞ ZAMANLI TOPLA DAĞIT ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ.....	4
2.1. Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi.....	4
2.2. Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi Literatür Araştırması.....	7
2.3. Heterojen Araç Rotalama Problemi.....	9
2.4. Heterojen Araç Rotalama Problemi Literatür Araştırması.....	11
2.5. Heterojen Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi....	13
2.6. Heterojen Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi Literatür Araştırması.....	16
3. HAVA ARAÇLARI ÜRETİMİ YAPAN BİR FİRMADA MALZEME TAŞIMA SİSTEMİ UYGULAMASI.....	19
3.1. Mevcut Durum ve Problem Tanımı.....	19
3.2. Tavlama Benzetimi Algoritması.....	22
3.2.1. Başlangıç Çözümü Üretme.....	24
3.2.2. Kabul Olasılık Fonksiyonu.....	24
3.2.3. Soğutma Çizelgesi.....	25
3.2.3.1. Başlangıç Sıcaklığı.....	25
3.2.3.2. Denge Durumu.....	25
3.2.3.3. Soğutma Fonksiyonu.....	25
3.2.3.4. Durdurma Koşulu.....	26
3.2.4. Komşuluk Yapısı.....	26
3.2.4.1. Turlar Arası Hareket Mekanizmaları.....	26

3.2.4.2. Tur İçi Hareket Mekanizmaları.....	27
3.3. Deneysel Çalışmalar ve Uygulama Sonuçları.....	28
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	32
KAYNAKLAR.....	34
EKLER	
EK 1: En Yakın Komşu Algoritması Adımları	
EK 2: Tavlama Benzetimi Algoritması Adımları	



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Uygulamada Ele Alınan Araç Bilgileri.....	21
Tablo 3.2 Test Problemlerinin Özellikleri.....	29
Tablo 3.3 Test Problemlerinin Sonuçları.....	29
Tablo 3.4 Uygulama Sonucu Oluşan Rotalar.....	31



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 ETD-ARP Temsili Gösterimi.....	5
Şekil 2.2 HARP Temsili Gösterimi.....	10
Şekil 2.3 HETD-ARP Temsili Gösterimi.....	13
Şekil 3.1 Uygulamanın Gerçekleştirildiği Firmada Mevcut Durumdaki Taşıma İşlemlerinin Temsili Gösterimi.....	20
Şekil 3.2 Tur Uygunluğu Örnek Gösterimi.....	28



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

J	Müşterilerin konumlarının kümesi
J_0	Depo ve tüm müşterilerin konumlarının kümesi
V	Araç kümesi
C	Araçların kapasitesi
C_{ij}	Konumlar arası uzaklıklar
D_j	j müşterisinin dağıtım miktarı
n	Düğüm sayısı
P_j	j müşterisinin toplama miktarı
M	büyük bir sayı
l'_v	v aracının depodan ayrılırken sahip olduğu yük miktarı
l'_j	j müşterisine servis sonrası araçta kalan yük miktarı
π_j	j düğümünün rotadaki konumu
x_{ijv}	v aracının i düğümünden j düğümüne uğraması durumunda 1, diğer durumlarda 0
N	Düğüm kümesi
T	Araç tiplerinin kümesi
a_k	k tipi aracın kapasitesi
f_k	k tipi aracın sabit maliyeti
v_k	k tipi aracın değişken maliyeti
c_{ij}^k	k tipi aracın (i, j) boyunca seyahat maliyeti
d_{ij}	Her müşteri çifti arası mesafe
q_i	i müşterisinin talebi
x_{ij}^k	k tipi aracın i müşterisinden j müşterisine uğraması durumunda 1, diğer durumlarda 0
y_i^k	i müşterisinin k tipi araç tarafından ziyaret edilmesi durumunda 1, diğer durumlarda 0
u_i^k	Alt turu engellemek için kullanılan karar değişkeni
B	Farklı tipteki araçlar kümesi
A	B kümesi üzerinde tanımlanan yönlü ayrıt kümesi
T_k	k tipi araçtan kullanılabilir araç sayısı
π_k	Her bir araç tipinin bir birim mesafeyi kat etme maliyeti
Q_k	Her bir araç tipinin kapasitesi
d_i	i müşterisinin dağıtım talebi
p_i	i müşterisinin toplama talebi
l_{ij}	i ve j müşterisi arası mesafe
c_{ijk}	k tipi aracın i ve j müşterileri arasındaki mesafeyi kat etme birim maliyeti
T_i	i iterasyonundaki sıcaklık değeri
T_f	Final sıcaklık değeri
ARP	Araç Rotalama Problemi
ETD-ARP	Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi
HARP	Heterojen Araç Rotalama Problemi
HETD-ARP	Heterojen Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi
TB	Tavlama Benzetimi Algoritması

1. GİRİŞ

Lojistik kavramı, ihtiyaç duyulan kaynakların, ihtiyacın ortaya çıktığı yerde ve istenilen zamanda temin edilmesi için kullanılan bir araç olarak tanımlanmaktadır. Amaç, ihtiyaçları karşılamak üzere her türlü ürün ve hizmetin çıkış noktasından varış noktasına kadar ulaştırılması sürecinin etkili şekilde planlanarak uygulanmasıdır.

Dünya nüfusunun artmasına bağlı olarak tedarik, taşıma ve malzeme ihtiyaçlarının da artması ile birlikte son 70 yıl içerisinde lojistik kavramının iş hayatına adapte olduğu görülmektedir. Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı Uluslararası Anlaşmalar ve Avrupa Birliği Genel Müdürlüğü'nün 2022'de yayınlamış olduğu Federal Almanya Pazar Bilgileri raporunda [1], Almanya'da lojistik sektöründe 3 milyon kişinin çalıştığı, farklı büyüklüklerde 60.000 firmanın lojistik sektöründe faaliyet gösterdiği belirtilmektedir. 2021 yılında lojistik sektörünün cirosunun 293 Milyar Euro olarak gerçekleştiği belirtilmektedir. Raporda Covid-19 pandemisi kaynaklı çoğu sektörün cirosunda düşüş yaşanmasına rağmen lojistik sektöründe artış meydana geldiği bilgisi yer almaktadır. Amerika Birleşik Devletleri için hazırlanan rapor ise insan ve yük taşımacılık hizmetlerinin, hizmet ithalatında %19,4'lük paya sahip olduğunu göstermektedir.

Lojistik faaliyetleri, yukarıda belirtilen raporlarda da ortaya konduğu gibi ülkelerin ekonomisinin yanı sıra firmalar için de büyük önem arz etmektedir. Firmaların maliyet kalemlerinin önemli bir kısmını lojistik faaliyetlerinin oluşturduğu bilinmektedir. Firmadan müşteriye yapılan taşıma işlemlerine ek olarak firma içinde gerçekleştirilen taşıma maliyetleri de üretimde göz ardı edilmemesi gereken maliyet kalemlerinden biridir. İyileştirme çalışmaları genellikle üretim yöntemleri için yapılarak karlılığın artırılması amaçlansa da, üretim faaliyetlerine ek olarak taşıma faaliyetlerinin de göz önüne alınması gerekmektedir.

Literatürde lojistik sektöründeki dağıtım ve ulaştırma faaliyetleri Araç Rotalama Problemi (ARP) altında incelenmektedir. ARP, tedarik, taşıma ve malzeme ihtiyaçlarının arttığı 1950'li yıllarda Dantzig ve Ramser [2] tarafından tanımlanarak modellenmektedir. Farklı model ve algoritmalar geliştirilerek ARP'ye çözüm aranmaktadır. ARP, müşterilerin dağıtım ve/veya toplama taleplerini karşılamak amacı ile araç kapasitesi, rota uzunluğu, zaman aralığı gibi kısıtların sağlanarak toplam taşıma maliyetinin en küçüklenmesi olarak tanımlanmaktadır. Sonraki yıllarda ise değişen ihtiyaçlar doğrultusunda yeni ARP türleri

ortaya çıkarak, bu yeni problem türlerine çözüm elde etmek için çeşitli yöntemler ortaya konmuştur.

Ortaya çıkan ARP türlerinden bir tanesi Heterojen ARP (HARP), diğer bir türü ise Eş Zamanlı Topla Dağıt ARP (ETD-ARP)'dir. ARP türlerinin çoğunda hız, kapasite, kiralama ve satın alma gibi sabit maliyet ve değişken maliyet özelliklerinin aynı olduğu homojen filo ele alınmaktadır. Fakat gerçek hayat uygulamalarında taşınan ürünlerin farklı olmasından kaynaklı, farklı özellikteki araçların kullanılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Farklı boyutlardaki ürünlerin farklı kapasitedeki araçlar ile taşınması, ya da düşük sıcaklıkta taşınması gereken ürünler için soğuk zinciri sağlayacak özel araçların kullanılması gerekebilir ve bu araçların da satın alma ve birim ulaştırma maliyetleri diğer araçlara göre farklılık gösterebilir. Bu gibi durumlar taşıma işlemlerinde heterojen filo kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle HARP'ye olan eğilimin arttığı gözlemlenmektedir. Klasik ARP'de aynı araç ile müşterilerin yalnızca dağıtım ya da toplama talepleri karşılanmaktadır. Müşterilerin yalnızca dağıtım ya da toplama taleplerinin aynı araç ile karşılanması, ihtiyaç duyulan araç sayısını arttırmaktadır. Bu nedenle özellikle son yıllarda artan tersine lojistik faaliyetlerine paralel olarak müşterilerin dağıtım ve toplama işlemleri eş zamanlı olarak, aynı araç tarafından gerçekleştirilmektedir. Tersine lojistik uygulamaları atıkların toplanarak geri dönüşüm ile tekrar kazandırılması açısından önem arz etmektedir. Bu problem türü literatürde Eş Zamanlı Topla Dağıt ARP (ETD-ARP) olarak adlandırılmaktadır. ETD-ARP'de hem yüklerin dağıtımı hem de toplama işlemi yapıldığından, kapasite kontrolünün yalnızca rota başında yapılması yeterli olmamaktadır. Araç rotasında ilerlerken de müşterilerden yükler toplandıkça araç kapasitesi kullanılmış olacaktır. Bu nedenle bir aracın kullanılabilir kapasitesi depodan çıkarken, uğrayacağı müşterilere dağıtımını yapacağı yüklerin toplamı kadar eksilmiş olacaktır. Araç her bir müşteriye uğradığında ise dağıtacağı yükü teslim ettiğinde kalan kapasite bırakılan yük kadar artacak fakat aynı zamanda müşteriden teslim alınacak yük kadar da tekrar azalacaktır. Yüklerin teslim edilmesi ve teslim alınması işlemleri sonrasında araçta bulunan yük toplamının araç kapasitesinden fazla olmaması gerekmektedir.

Bu tez kapsamında hava araçları parça üretimi yapan bir firmadaki belirli bir üretim alanında farklı kapasitelere sahip araçlar tarafından gerçekleştirilen firma içi malzeme taşıma işlemleri incelenmektedir. Taşıma işlemleri sırasında parçaların teslim edildiği alanlardan aynı zamanda depoya götürülmek üzere farklı parçalar da teslim alınmaktadır.

Kullanılan araçların farklı kapasite özelliklerine sahip olması ve parça dağıtım ve toplama işlemlerinin eş zamanlı olarak yapılmasından kaynaklı, ele alınan problem literatürdeki Heterojen Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (HETD-ARP) ile uyumludur. HETD-ARP ile ilgili yapılan önceki çalışmalarda farklı matematiksel modeller ortaya konmaktadır. Fakat matematiksel model ile büyük boyutlu problemler için makul sürede çözüm elde edilememektedir. Uygulamadaki taşıma işlemlerinin gerçekleştirildiği müşteri sayısı, makul sürede en iyi çözümün elde edilebildiği problem boyutundan fazla olduğundan, çözüm elde etmek için çalışmada Tavlama Benzetimi (TB) Algoritması kullanılmaktadır. Geliştirilen TB algoritmasının etkinliğini test etmek amacı ile matematiksel model ile en iyi çözümü bulunmuş küçük boyutlu problemler kullanılarak, en iyi çözüm ile geliştirilen TB algoritması sonuçları karşılaştırılmaktadır.

Tezin ikinci bölümünde araç rotalama problemi tanımlanmaktadır. Ardından sırasıyla ETD-ARP ve HARP tanımları yapılarak bu problemler ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir. Son olarak incelenen sistemin HETD-ARP tanımına uyduğu ortaya konmakta ve HETD-ARP ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

Üçüncü bölümde incelenen sistem hakkında genel bilgiler yer almaktadır. Ardından kullanılan TB Algoritması hakkında bilgi verilmektedir. Bu kapsamda, kullanılan başlangıç çözümü yöntemi, TB Algoritması için belirlenmesi gereken parametreler hakkındaki bilgilere yer verilmektedir. Ardından algoritmanın etkinliğini analiz etmek için kullanılan test problemleri hakkında bilgi verilip, test problemlerinin algoritma ile çözümünden elde edilen sonuçlar açıklanmaktadır. Son olarak uygulamanın gerçekleştirildiği sistem verileri ile uygulanan algoritma sonuçları paylaşılmaktadır.

Tezin dördüncü ve son bölümünde ise, genel değerlendirme yapılarak çalışmalar özetlenmekte ve bu konuda ileride yapılabilecek çalışmalar önerilmektedir.

2. HETEROJEN EŞ ZAMANLI TOPLA DAĞIT ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Nüfusun artması ile birlikte mal ve hizmet ulaştırma amacı ile yapılan taşıma işlemlerinin sayısı da artmaktadır. Böylece firmaların katlanmak zorunda kaldıkları maliyetlerde de artış gözlemlenmekte, taşıma maliyetlerinin azaltılması önem verilen bir amaç haline gelmektedir. Bunun yanı sıra farklı özellikteki ürünlerin de müşteriler tarafından talep edilmesinden kaynaklı olarak, talep edilen ürünleri taşıyabilen farklı özellikteki araçların da kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Tüm bu ihtiyaçlar doğrultusunda farklı taşıma türleri ortaya çıkmaktadır. Literatürde müşteri taleplerinin belirli kısıtlar altında minimum maliyetle gerçekleştirilmesi problemi, Araç Rotalama Problemi (ARP) olarak tanımlanmaktadır.

Heterojen Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (HETD-ARP), literatürde, ARP sınıflandırmalarında yer alan "Toplama ve Dağıtım" ve "Heterojen" sınıflarının özelliklerini barındıran bir problemdir. HETD-ARP, eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi (ETD-ARP) ve heterojen araç rotalama problemi (HARP) kısıtlarını birlikte sağlar. Bu bölümde öncelikle ETD-ARP ve HARP'nin tanımı yapıp bu problemler ile ilgili yapılan literatür araştırmalarına yer verilmekte, ardından HETD-ARP problemi tanımlanarak, HETD-ARP ile ilgili yapılan literatür araştırmasına yer verilmektedir.

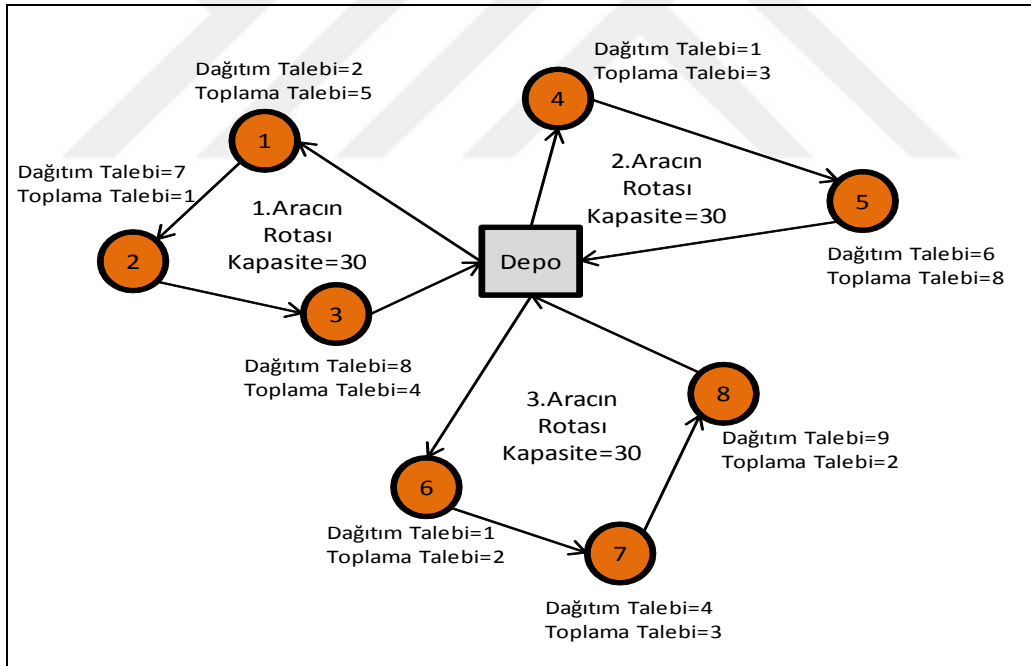
2.1. Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (ETD-ARP)

Günümüzde özellikle lojistik sektöründe yapılan ürün dağıtımına ek olarak müşterilerden ürünlerin toplanması da söz konusu olduğundan işletmeler geri dönüşüm faaliyetleri sayesinde ekonomik getiri elde etmektedirler. Müşterilerden toplanan ürünlerin yeniden işlenerek tekrar değerlendirilmesi, firmaları lojistik ağlarını en etkin şekilde kullanmaya zorunlu kılmaktadır. Aynı zamanda, araçların hem müşteri taleplerini teslim etmek hem de müşterilerden ürünlerini toplamak için farklı zamanlarda çalıştırılmaları gereksiz araç kullanımına neden olduğundan, müşterilerin bulunduğu konumlarda toplama ve dağıtım işlemlerinin eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesi, hem araçların daha verimli kullanılmasını sağlamakta hem de maliyet açısından fayda yaratmaktadır. Eş zamanlı yapılan bu dağıtım ve toplama işlemlerinin temsili gösterimi Şekil 2.1'de verilmektedir. Şekilde yuvarlaklar müşterileri, dikdörtgen şekli ise depoyu temsil etmektedir. Her

müşteriye ait dağıtım ve toplama talepleri ile her rotaya atanan aracın kapasitesi belirtilmektedir. Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi kapasiteleri eşit araçlar ile hem dağıtım hem de toplama talepleri bulunan müşteriler ziyaret edilmektedir.

Boş şişelerin marketlerden, yeniden kullanılabilir özel paletlerin mağazalardan toplanması, dağıtım yapılan esnada toplama işleminin de eş zamanlı gerçekleştirildiği örneklerdendir.

Bir veya daha fazla depodan alınan müşteri taleplerinin dağıtım işleminin ve müşterilerden alınarak depolara gidecek ürünlerin toplama işlemlerinin eşit kapasiteli araçlar ile eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesi problemi literatürde Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (ETD-ARP) olarak adlandırılmaktadır. ETD-ARP'de amaç, araçların toplam kat ettiği yolu en küçükleyerek, müşterilerin taleplerinin karşılanabileceği araç rotalarını oluşturmaktır.



Şekil 2.1. ETD-ARP Temsili Gösterimi

Dethloff [1] çalışmasında Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi'nin matematiksel modelini aşağıdaki gibi tanımlamıştır.

İndisler:

J : müşterilerin konumlarının kümesi

J_0 : depo ve tüm müşterilerin konumlarının kümesi $J_0 = J \cup \{0\}$

V : araç kümesi

Parametreler:

C : araçların kapasitesi

C_{ij} : konumlar arası uzaklıklar $i \in J_0, j \in J_0, i \neq j, C_{ii} = M, i \in J, C_{00} := 0$

D_j : j müşterisinin dağıtım miktarı $j \in J$

n : düğüm sayısı

P_j : j müşterisinin toplama miktarı $j \in J$

M : büyük bir sayı $M = \max \{ \sum_{j \in J} (D_j + P_j), \sum_{i \in J_0} \sum_{j \in J_0, j \neq i} C_{ij} \}$

Karar Değişkenleri:

l'_v : $v \in V$ aracının depodan ayrılırken sahip olduğu yük miktarı

l'_j : $j \in J$ müşterisine servis sonrası araçta kalan yük miktarı

π_j : alt turları engellemek için kullanılan karar değişkeni. $j \in J$ düğümünün rotadaki konumu

x_{ijv} : $v \in V$ aracının $i \in J_0$ düğümünden $j \in J_0$ düğümüne uğraması durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alır

subject to

$$\sum_{i \in J_0} \sum_{v \in V} x_{ijv} = 1 \quad (j \in J) \quad (1)$$

$$\sum_{i \in J_0} x_{isv} = \sum_{j \in J_0} x_{sjv} \quad (s \in J, v \in V) \quad (2)$$

$$l'_v = \sum_{i \in J_0} \sum_{j \in J} D_j x_{ijv} \quad (v \in V) \quad (3)$$

$$l_j \geq l'_v - D_j + P_j - M(1 - x_{0jv}) \quad (j \in J, v \in V) \quad (4)$$

$$l_j \geq l_i - D_j + P_j - M(1 - \sum_{v \in V} x_{ijv}) \quad (i \in J, j \in J, j \neq i) \quad (5)$$

$$l'_v \leq C \quad (v \in V) \quad (6)$$

$$l_j \leq C \quad (j \in J) \quad (7)$$

$$\pi_j \geq \pi_i + 1 - n(1 - \sum_{v \in V} x_{ijv}) \quad (i \in J, j \in J, j \neq i) \quad (8)$$

$$\pi_j \geq 0 \quad (j \in J) \quad (9)$$

$$x_{ijv} \in \{0,1\} \quad (i \in J_0, j \in J_0, v \in V) \quad (10)$$

kısıtları altında

$$En\ küçük\ z = \sum_{i \in J_0} \sum_{j \in J_0} \sum_{v \in V} C_{ij} x_{ijv} \quad (11)$$

(1) numaralı kısıt, araçların her müşteriye yalnız bir kez uğramasını sağlar. (2) numaralı kısıt, her müşteriden ayrılan ve her müşteriye varan aracın aynı olmasını sağlar. (3) numaralı kısıt, aracın başlangıç yükünü ifade eder. (4) numaralı kısıt, ilk müşteriye uğradıktan sonra araçtaki yük miktarını ifade eder. (5) numaralı kısıt, rota boyunca araçtaki yük miktarını ifade eder. (6) ve (7) numaralı kısıtlar ilk müşteriden sonra ve rota boyunca araçtaki yük miktarının aracın kapasitesini aşmamasını sağlar. (8) numaralı kısıt alt turların oluşmasını engeller. (9) ve (10) numaralı kısıtlar, karar değişkenlerin alabilecekleri değerleri kısıtlar. (11) numara amaç fonksiyonu toplam seyahat mesafesinin en küçüklenmesini ifade eder.

2.2. Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (ETD-ARP) Literatür Araştırması

Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi ilk kez 1989 yılında Min [3] tarafından bir kütüphane sistemi ele alınarak yapılan çalışmada işlenmiş, bu çalışmada matematiksel formülasyon ile önce kümeleme sonra rotalama yöntemine dayalı sezgisel bir algoritma önerilmektedir.

Dethloff [4] çalışmasında düğüm tabanlı bir matematiksel model ve eklemeye dayalı bir sezgisel algoritma önermektedir.

Crispim ve Brandao [5] çalışmalarında tabu arama ve değişken komşu iniş algoritmasını içeren hibrit bir yöntem önermektedirler.

Tang, Montane ve Galvao [6] tabu arama algoritması kullandıkları çalışmalarında, çözüm elde etmede yer değiştirme, değişim ve geçiş hareketlerini içeren farklı çözüm hareketlerini kullanarak, alternatif rota içi çözümleri elde etmede ise 2-opt algoritmasını ele almaktadırlar.

Amico, Salani ve Righini [7] çalışmalarında dal ve fiyat tekniği kullanarak problemi ele alarak fiyatlandırma alt problemini çözmek için farklı yöntemleri karşılaştırmaktadırlar.

Righini ve Bianchessi [8] çalışmalarında ETD-ARP için yapıcı algoritmalar, yerel arama algoritmaları ve tabu arama algoritmasını karşılaştırmaktadırlar.

Ai ve Kachitvichyanukul [9] problemin çözümünde Kuş Sürüsü Algoritmasını kullanarak yeni en iyi çözümler elde etmeyi başardıklarını çalışmalarında belirtmektedirler.

Zachariadis, Tarantilis ve Kiranoudis [10] çalışmalarında tabu arama ve yerel arama algoritmasını kullanarak, arama uzayında fazla sayıda çözüme ulaşmakta ve yerel optimuma yakalanmadan optimum sonuca yakın çözüm bölgelerine ulaşmaktadırlar. Çalışmaları sonucunda kaliteli çözümler elde ederek daha önce bulunan en iyi çözümleri geliştirdiklerini ortaya koymaktadırlar.

Gajpal ve Apad [11] çalışmalarında ETD problemi çözümünde karınca kolonisi algoritmasını ele almaktadırlar.

Zachariadis ve ark. [12] çalışmalarında uyarlanabilir hafıza algoritmasını Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problem'ine uygulamaktadırlar.

Göksal, Karaoğlu ve Altıparmak [13] tarafından Değişken Komşu İnış Algoritması ve Kuş Sürüsü Optimizasyonu'nu içeren hibrit bir algoritma ele alınmaktadır.

Zachariadis ve Kiranoudis [14] çalışmalarında yerel arama tabanlı metasezgisel bir algoritma önermektedirler. Önerilen metasezgisel algortmada çözüm kümelerini verimli bir şekilde bulabilmek amacı ile Statik Hareket Tanımlama stratejisi kullanarak arama uzayında aynı çözümlere tekrar ulaşmak önlenip çeşitlendirme sağlanmaktadır.

Avcı ve Topaloğlu [15] tarafından hem Karışık Topla Dağıt hem de Eş Zamanlı Topla Dağıt ARP problemlerinin çözümünde kullanılabilecek tavlama benzetimi ve değişken komşu inış algoritmalarını bir arada ele alan hibrit bir algoritma ele alınmaktadır.

Belgin, Karaoğlu ve Altıparmak [16] tarafından İki Kademeli Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi'ni ele alınmaktadır. İlk kademede depodan uydulara, ikinci kademede ise uydulardan müşterilere dağıtım gerçekleştirilmektedir. Çalışmada düğüm tabanlı bir matematiksel model önerilmektedir. Ele alınan problem polinom zamanda en iyi çözüme ulaşamayan bir problem olduğundan değişken komşu inış ve yerel arama algoritmalarından oluşan hibrit bir algoritma önerilmektedir.

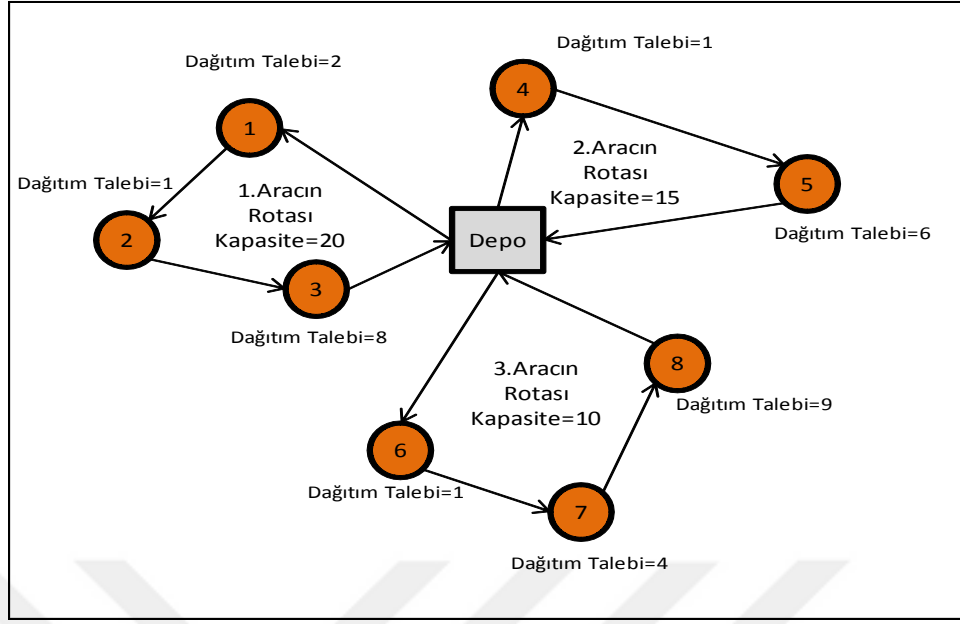
Hornstra ve ark. [17] tarafından elleçleme maliyetlerini de dikkate alan ETD ARP ele alınmaktadır. Çalışmada araca yüklenen son yük dışındaki diğer yükler için elleçleme işlemi gereksinimi olduğunu ortaya koyarak, elleçleme kurallarının göz önüne alındığı bir komşu arama sezgiseli önerilmektedir.

2.3. Heterojen Araç Rotalama Problemi (HARP)

Lojistik sektöründe araç filolarında bulunan araçların kapasite, hız, sabit ve değişken maliyet, uygunluk, maksimum seyahat zamanı gibi özellikleri genellikle farklılık göstermektedir. Gerçek hayatta özellikleri birbirinin aynısı olan araçları barındıran filolar nadir karşılaşılan durumlardır. Birbirinden farklı özelliklere sahip araçların göz önüne alındığı Heterojen Araç Rotalama Problemi'nde (HARP) her bir araç tipi sayısı sınırlı ya da sınırsız sayıda olabilir. HARP'nin temsili gösterimi Şekil 2.2'de verilmektedir. Şekilde yuvarlaklar müşterileri, dikdörtgen şekli ise depoyu temsil etmektedir. Her müşteriye ait dağıtım talepleri ile her rotaya atanan aracın kapasitesi belirtilmektedir. Şekil 2.2'de de görüldüğü gibi farklı kapasitelere sahip araçlar depodan çıkarak müşterilerin dağıtım taleplerini karşılamak suretiyle depoya geri dönmektedir.

Siriruk ve Tangmo [18] çalışmalarında Heterojen Araç Rotalama Problemi'nin matematiksel modelini şu şekilde tanımlamaktadırlar:

N düğüm kümesidir $N = \{0, \dots, n\}$. 0 düğümü depoyu ifade etmektedir. T araç tiplerinin kümesini ifade etmektedir $T = \{1, \dots, K\}$. a_k , k tipi aracın kapasitesini, f_k , k tipi aracın sabit maliyetini, v_k , k tipi aracın değişken maliyetini ve c_{ij}^k , $k \in T$ tipi aracın (i, j) boyunca seyahat maliyetini ifade etmektedir. d_{ij} , her müşteri çifti arası mesafedir. q_i , i müşterisinin talebini ifade etmektedir. Modelde üç adet karar değişkeni bulunmaktadır. x_{ij}^k , k tipi aracın i müşterisinden j müşterisine uğraması durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alır. y_i^k , i müşterisinin k tipi araç tarafından ziyaret edilmesi durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alır. u_i^k , alt turu engellemek için kullanılan karar değişkenidir.



Şekil 2.2. HARP Temsili Gösterimi

$$\sum_{j=1}^N x_{0j}^k \leq 1 \quad (k = 1, \dots, K) \quad (12)$$

$$\sum_{i=0}^N x_{ip}^k - \sum_{j=0}^N x_{pj}^k = 0 \quad (p = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K) \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^K y_i^k = 1 \quad (i = 1, \dots, N) \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N q_i y_i^k \leq a_k \quad (k = 1, \dots, K) \quad (15)$$

$$y_i^k \leq \sum_{j=0}^N x_{ji}^k \quad (i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K) \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N x_{ij}^k \geq 1 \quad (j = 1, \dots, N) \quad (17)$$

$$u_i^k \geq u_j^k + q_i - a_k + a_k (x_{ij}^k + x_{ji}^k) - x_{ij}^k (q_i + q_j) \quad (i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K, i \neq j) \quad (18)$$

$$u_i^k \leq a_k - x_{0i}^k (a_k - q_i) \quad (i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K) \quad (19)$$

$$u_i^k \leq q_i + \sum_{j=1}^N q_j x_{ji}^k \quad (i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K) \quad (20)$$

kısıtları altında

$$\text{En küçük } \sum_{k=1}^K f_k \sum_{j=1}^N x_{0j}^k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (21)$$

(12) ve (13) numaralı kısıtlar araçların depodan çıkıp müşterilere uğradıktan sonra tekrar depoya dönmelerini sağlar. (14) numaralı kısıt her bir müşteriye yalnızca bir aracın uğramasını sağlar. (15) numaralı kısıt müşteri taleplerinin dağıtım sırasında araç

kapasitesinin aşılmasını engeller. (16) numaralı kısıt her müşterinin talebinin müşteriye ziyaret eden araç tarafından karşılanmasını sağlar. (17) numaralı kısıt her bir j müşterisinin rota boyunca i müşterisinden sonra en az bir araç ile ziyaret edileceğini garanti eder. (18)-(20) numaralı kısıtlar alt tur engelleme kısıtlarıdır. (21) numara amaç fonksiyonu araçların sabit maliyetleri ve değişken maliyetlerin toplamının en küçüklenmesini ifade eder.

2.4. Heterojen Araç Rotalama Problemi (HARP) Literatür Araştırması

Literatürde heterojen filodan bahsedilen ilk çalışma 1959 yılında Kirby [19] tarafından ortaya konmaktadır. Çalışmada vagonların kiralama veya satın alınma seçenekleri arasındaki fark bir model ile değerlendirilmektedir.

Gendreau ve ark. [20] çalışmalarında Heterojen Filo Araç Rotalama Problemi için tabu arama algoritması önerilmektedir.

Lima ve ark. [21] 2004 yılında yaptıkları çalışmada aynı problem için bir memetik algoritma ortaya konarak, GENIUS ve λ -interchange yerel arama teknikleri ile hibrit edilmiş genetik algoritma sunulmaktadır.

Dondo ve Cerda [22] tarafından çok depolu ve zaman pencereci heterojen araç rotalama problemi için kümeleme temelli bir optimizasyon yaklaşımı ele alınmaktadır. Çalışmada üç aşamalı bir sezgisel algoritma önerilmektedir. İlk aşamada zaman kısıtlı araç rotalama problemi için bir matematiksel model geliştirilip, bu model ile 25 müşterili bir problem için en iyi çözüm elde edilebildiği görülmektedir. Müşteri sayısı sınırlandırmasını aşmak için müşteriler sınıflandırılarak hiyerarşik hibrit yöntemler içeren bir sezgisel sunulmaktadır. İlk faz maliyet efektif müşteri kümelerini oluşturmayı, ikinci faz ise kümeleme ile karma tam sayılı doğrusal programlama kullanılarak kümelere uygun araçları atamayı sağlamaktadır. Üçüncü fazda ise kümeler içindeki düğümler sıralanarak araçların kümelere varış zamanları çizelgelenmektedir.

Heterojen Araç Rotalama Problemi ile ilgili 2007 yılında yapılan çalışmalardan bir diğeri ise Choi ve Tcha [23] tarafından ortaya konmaktadır. Konu çalışmada kolon türetmeye dayalı bir yaklaşım önerilmektedir. Sıkı tam sayılı programlama modeli sunulup kolon türetme tekniği ile model gevşetilerek doğrusal programlama olarak çözülmektedir. Sonuçlar, önerilen yöntemin çözüm kalitesi ve çözüm süresi açısından mevcut tüm algoritmalarından daha iyi olduğunu göstermektedir.

Lia ve ark. [24] tarafından yapılan çalışmada ise her tipteki araç sayısının sabit olduğu heterojen filo ele alınmaktadır. Amaç, kapasite, değişken ve sabit maliyetleri birbirinden farklı olan araçların kullanımının en iyi şekilde sağlanmasıdır. Çalışmada Heterojen Araç Rotalama Problemi için daha önce önerilen yöntemler değerlendirilerek standart araç rotalama problemine heterojen filo özelliği dâhil edilerek kayıt-kayıt seyahat algoritması (Record-to-record traveling algorithm) önerilmektedir. Önerilen yöntem daha önce yapılmış çalışmalarda ele alınan 8 farklı probleme ek olarak müşteri sayısı 200 ile 360 arasında değişen 5 yeni problemde uygulanmaktadır.

2009 yılında Imran ve ark. [25] tarafından yapılan çalışmada ise Heterojen Araç Rotalama Problemi için değişken komşu arama temelli bir sezgisel yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemde problem için uyarlanmış farklı komşuluklar kullanılarak çeşitlendirme prosedürleri ile farklı çözümlere ulaşmayı sağlayan bir yerel arama algoritması ortaya konmaktadır.

Prins [26] tarafından yapılan çalışmada ise heterojen filolu araç rotalama problemi için iki farklı memetik algoritma önerilmektedir. Önerilen algoritmalar hem her tipteki araç sayısının limitsiz olduğu hem de her tipteki araç sayısının belirli olduğu heterojen araç rotalama problemlerini çözebilmektedir. Algoritmalar rota kısıtları olmadan büyük turlar olarak kodlanmış kromozomlara, bu turları uygulanabilir rotalara bölen ve bunlara araçlar atayan optimum geliştirme prosedürlerine dayalıdır.

2011 yılında Bettinelli ve ark. [27] tarafından yapılan çalışmada ise farklı depolardan beslenen, farklı kapasite ve sabit maliyete sahip olan araçlardan oluşan ve zaman pencereli araç rotalama problemi için dal-kesme-fiyat algoritması önerilmektedir.

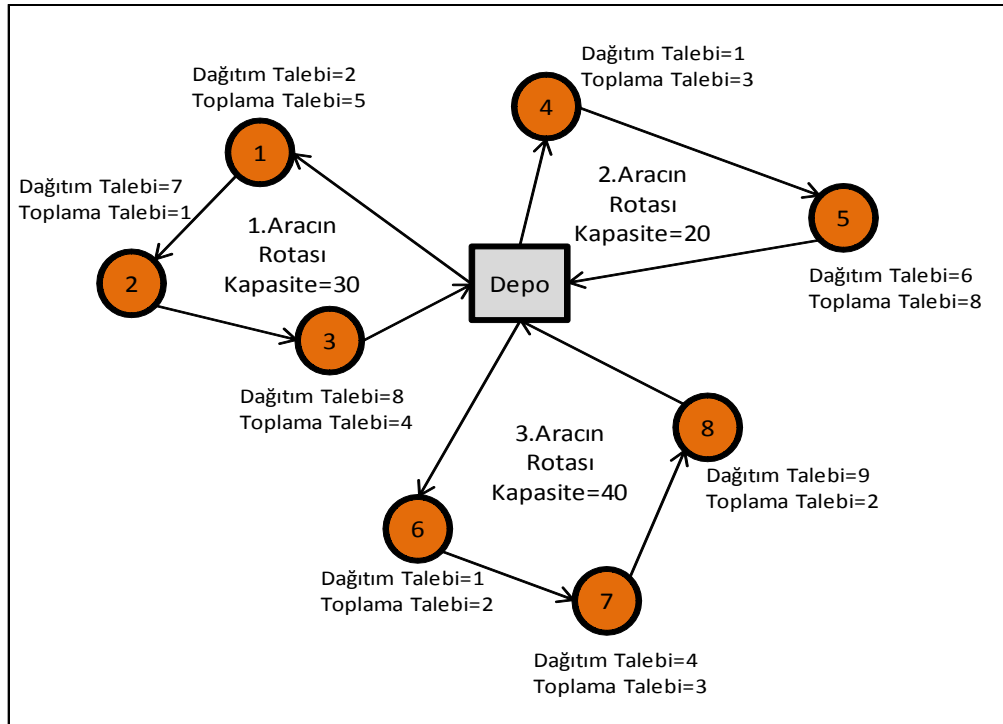
Brandao [28] çalışmasında heterojen sabit filolu araç rotalama problemi için tabu arama algoritması önermektedir. Elde edilen sonuçların kabul edilebilir çözüm süresi içerisinde kaliteli çözümler elde edebildiği ortaya konmaktadır.

Xu ve ark. [29] tarafından çok depolu ve zaman pencereli heterojen araç rotalama problemi için bir matematiksel model önererek geliştirilmiş değişken komşu arama algoritması ortaya konmaktadır. Algoritmada farklı komşulara gidebilmek için hibrit bir ekleme ve değiştirme operatörü kullanılıp, en iyi iyileştirme stratejisi benimsenmektedir. Böylece algoritmanın çözüm kalitesi ve çözüm elde etme süresi arasındaki denge sağlanmaya çalışılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, önerilen algoritmanın problem için uygulanabilir ve diğer çalışmalar ile kıyaslanabilir çözümler olduğunu göstermektedir.

Koc ve ark. tarafından [30] 2016 yılında yapılan çalışmada, Heterojen Araç Rotalama Problemi için sınıflandırma yapılarak daha önceki çalışmalarda önerilen çözüm yöntemleri gözden geçirilmektedir. Önerilmiş sezgisel yöntemler için karşılaştırma yapılmaktadır.

2.5. Heterojen Eş Zaman Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (HETD-ARP)

Günümüzde araçların verimli kullanılması ve maliyet etkin taşıma faaliyetleri elde etmek adına, müşterilerin bulunduğu konumlarda dağıtım ve toplama işlemleri farklı özellikteki (kapasite, hız, uygunluk vb) araçlar tarafından aynı eş zamanlı gerçekleştirilmektedir. Yukarıdaki bölümlerde anlatılan araç rotalama problemlerinin birlikte ele alınması sonucu oluşan problem Heterojen Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (HETD-ARP) olarak adlandırılmaktadır. HETD-ARP'ye ait temsili gösterim Şekil 2.3'de yer almaktadır. Şekilde yuvarlaklar müşterileri, dikdörtgen şekli ise depoyu temsil etmektedir. Her müşteriye ait dağıtım ve toplama talepleri ile her rotaya atanan aracın kapasitesi belirtilmektedir. Şekil 2.3'de de görüldüğü gibi, hem dağıtım hem toplama talebi olan müşteriler farklı kapasitelere sahip araçlar tarafından ziyaret edilmektedir.



Şekil 2.3. HETD-ARP Temsili Gösterimi

HETD-ARP'de dağıtım ve toplama işlemi aynı araç ile gerçekleştirilmektedir. HETD-ARP'nin varsayımları aşağıdaki gibidir:

- Her bir araç tipinin sabit maliyetleri (satın alma, kiralama vb.) ve kapasiteleri önceden bilinir, sabittir ve birbirinden farklıdır,
- Her bir müşterinin talep ettiği ve arz ettiği ürün miktarı önceden bilinir ve sabittir,
- Her bir müşteriye hem ürün teslimatı yapılır hem de müşteriden ürün toplanır ve bu iki faaliyet eş zamanlı ve anlık gerçekleştirilir,
- Müşterilere dağıtılacak ve müşterilerden toplanacak ürünler homojen (veya aynı birim ile ifade edilen) ürünlerdir,
- Araçların birim mesafeyi kat etmeleri durumunda ortaya çıkan değişken maliyet önceden bilinir ve sabittir,
- Araçların toplam kapasitesi, toplama ve/veya dağıtım taleplerinin toplamından büyüktür.

Keçeci, Altıparmak ve Kara [31] çalışmalarında Heterojen Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi'nin matematiksel modelini aşağıdaki gibi tanımlamışlardır:

$G(N, A)$ tam bağlı ve yönlü bir serim olmak üzere, N düğüm kümesini $N = \{0, \dots, n\}$ ve B farklı tipteki araçlar kümesini $B = \{1, \dots, b\}$ ifade etmektedir. A kümesi ise bu kümeler üzerinde tanımlanan yönlü ayrıt kümesidir $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$. N kümesindeki 0 depoyu, diğerleri ise müşterileri ifade etmektedir. Her $k \in B$ tipi araçtan kullanılabilir T_k adet bulunmaktadır ve f_k her bir araç tipinin kullanım (sabit) maliyetini, π_k her bir araç tipinin bir birim mesafeyi kat etme maliyetini, Q_k her bir araç tipinin kapasitesini ifade etmektedir. Her bir i müşterisinin d_i kadar dağıtım talebi ve p_i kadar ise toplama talebi bulunmaktadır. Her bir müşterinin talebi 0 veya daha büyüktür ($0 \leq d_i$). Her bir müşterinin toplama talebi araç kapasitesinden azdır ($p_i \leq Q_k$) ve deponun toplama ve dağıtım talepleri sıfıra eşittir ($d_0 = 0, p_0 = 0$). l_{ij} , i ve j müşterisi arası mesafeyi ifade etmekte ve üçgen eşitsizliği ($l_{ij} + l_{jr} \geq l_{ir}, \forall i, j, r \in N, i \neq j \neq r$) sağlanmaktadır. c_{ijk} ise k tipi aracın i ve j müşterileri arasındaki mesafeyi kat etme birim maliyetidir. HETD-ARP, tanımlanan G serimi üzerinde toplam taşıma ve araç kullanım maliyetlerini en küçükleyecek m adet araç rotasının ve her bir rotada kullanılacak araç tipinin tespit edilmesi problemidir. Rotaların ve her bir rotada kullanılacak araç tipleri tespit edilirken aşağıdaki kısıtların sağlanması gerekmektedir:

- Her rotada yalnızca bir tip aracın bulunması gerekir,
- Her bir müşteri yalnızca bir kez ve bir tip araç tarafından ziyaret edilmelidir,
- Her bir aracın rotasının depoda başlayıp depoda sonlanması gerekmektedir,
- Her turda dağıtılacak yük miktarı, müşterilerden toplanacak yük miktarı ve her müşteriye gerçekleştirilen yükleme-boşaltma işlemleri sonrasında araçta yer alan yük miktarı, aracın kapasitesini aşmamalıdır.

Modelde beş adet karar değişkeni yer almaktadır. x_{ijk} , (i,j) ayrıtının k aracının rotasında yer alması durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini almaktadır. y_k , k tipi araçtan seçilecek araç sayısını ifade etmektedir. m tur sayısını ifade etmektedir. z_{ij} , (i,j) ayrıtının bir aracın turu üzerinde olması durumunda, aracın j 'nci düğüme gelene kadar dağıtılacak yük miktarını; t_{ij} , (i,j) ayrıtının bir aracın turu üzerinde olması durumunda, aracın j 'nci düğüme gelene kadar toplanan yük miktarını ifade etmektedir.

$$\sum_{j \in N \setminus \{0\}} \sum_{k \in B} x_{0jk} \leq m \quad (22)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{k \in B} x_{i0k} \leq m \quad (23)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq j} \sum_{k \in B} x_{ijk} = 1 \quad (j \in N \setminus \{0\}) \quad (24)$$

$$\sum_{j \in N, i \neq j} x_{ijk} = \sum_{j \in N, i \neq j} x_{jik} \quad (i \in N \setminus \{0\}, k \in B) \quad (25)$$

$$z_{ij} + t_{ij} \leq \sum_{k \in B} Q_k x_{ijk} \quad (i, j \in N, i \neq j) \quad (26)$$

$$\sum_{j \in N, i \neq j} z_{ji} - \sum_{j \in N, i \neq j} z_{ij} = d_i \quad (i \in N) \quad (27)$$

$$\sum_{k \in B} d_j x_{ijk} \leq z_{ij} \leq \sum_{k \in B} (Q_k - d_i) x_{ijk} \quad (i, j \in N, i \neq j) \quad (28)$$

$$\sum_{j \in N, i \neq j} t_{ij} - \sum_{j \in N, i \neq j} t_{ji} = p_i \quad (j \in N \setminus \{0\}) \quad (29)$$

$$\sum_{k \in B} p_i x_{ijk} \leq t_{ij} \leq \sum_{k \in B} (Q_k - p_j) x_{ijk} \quad (i, j \in N, i \neq j) \quad (30)$$

$$z_{i0} = 0 \quad (i \in N \setminus \{0\}) \quad (31)$$

$$t_{0j} = 0 \quad (j \in N \setminus \{0\}) \quad (32)$$

$$\sum_{k \in B} y_k \leq m \quad (33)$$

$$y_k \leq T_k \quad (k \in B) \quad (34)$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{0\}} x_{0jk} \leq y_k \quad (k \in B) \quad (35)$$

$$y_k \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad (k \in B) \quad (36)$$

$$m \geq 0 \quad (37)$$

$$z_{ij}, t_{ij} \geq 0 \quad (i, j \in N) \quad (38)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (i, j \in N, k \in B) \quad (39)$$

kısıtları altında

$$\text{En küçük } z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, i \neq j} \sum_{k \in B} c_{ijk} x_{ijk} + \sum_{k \in B} f_k y_k \quad (40)$$

(22) ve (23) numaralı kısıtlar depodan en fazla m tane aracın ayrılmasını ve depoya en fazla m tane aracın dönmesini sağlar. (24) numaralı kısıt herhangi bir düğüme yalnızca bir düğümden gidilmesini, (25) numaralı kısıt ise herhangi bir düğüme uğrayan ve bu düğümlerden ayrılan araçların aynı olmasını sağlar. (26) numaralı kısıt herhangi iki düğüm arası araç kapasitesinin aşılmasını engeller. (27) numaralı kısıt aracın dağıtım yükünün, araç rotasında ilerlerken azalmasını; (29) numaralı kısıt ise araç rotasında ilerlerken aracın topladığı yük miktarının artmasını sağlar. (28) numaralı kısıt ile aracın dağıtım yükü için, (30) numaralı kısıt ile aracın topladığı yük için alt ve üst sınırlar belirlenir. (31) ve (32) numaralı kısıtlar sırasıyla aracın dağıtım yükü tur sonunda ve aracın topladığı yükü tur başında sıfıra eşitler. (33) numaralı kısıt en fazla m tane aracın seçilmesini sağlar. (34) numaralı kısıt ile her araç tipinden en fazla mevcut miktar kadar seçilebilmesi sağlanır. (35) numaralı kısıt depodan çıkacak k tipi araç sayısının, filodan seçilecek k tipi araç sayısına eşit olmasını sağlar. (36), (37), (38) ve (39) numaralı kısıtlar işaret kısıtlarıdır. (40) numaralı amaç fonksiyonunda ise taşıma ve araç kullanım maliyetlerinin en küçüklenmesi ifade edilir.

2.6. Heterojen Eş Zaman Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (HETD-ARP)

Literatür Araştırması

HETD-ARP problemi ilk kez 2014 yılında Keçeci, Altıparmak ve Kara [31]'nin çalışmasında ele alınmaktadır. Bu çalışmada akış tabanlı bir matematiksel model önerilmektedir. Ele alınan problem NP-HARD olduğundan, büyük boyutlu problemler için önerilen matematiksel model ile makul zamanda çözüm elde etmek mümkün olmayacağından, büyük boyutlu problemler için çözüm elde etmek amacı ile Clark and Wright algoritması HETD-ARP problemine uyarlanarak sunulmuştur.

Alağuş, Çetin, Yerlikaya ve Eren [32] tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada Keçeci, Altıparmak ve Kara [31] tarafından önerilen matematiksel model tehlikeli malzemelerin taşınması uygulaması için kullanılmaktadır.

Avcı ve Topaloğlu [33] çalışmalarında HETD-ARP problemi için eşik ayarlama stratejisinin tabu arama ile entegre edildiği bir hibrit yerel arama algoritması önermektedirler. Önerilen bu yöntemde tabu liste uzunluğu haricinde herhangi bir parametre belirleme işlemine gerek olmadığından uygulaması basit bir yöntem olduğu

ifade edilmektedir. Sonuçlar, önerilen yaklaşımın verimli çözümler üretebileceğini göstermektedir.

Keçeci, Altıparmak ve Kara [34] bir başka çalışmalarında ise orta ve büyük boyutlu problemler için hibrit meta sezgisel yaklaşım önermektedirler. Önerilen bu yaklaşımın çözüm elde etme süresi açısından etkin olduğu ve kaliteli başlangıç çözümler elde edilebildiği ortaya konmaktadır.

Li, Wang, Chen, Li, Gao ve Wang [35] tarafından yapılan çalışmada ise çevreyi korumak ve hizmet kalitesini arttırmak amacı ile elektrikli araçlardan oluşan filo için zaman pencereli HETD-ARP problemi ele alınmaktadır. Ele alınan karma tam sayılı modelde amaç fonksiyonu enerji tüketimi ile ifade edilmektedir. Değişken komşu arama algoritması önerilen modeli çözmek için kullanılmaktadır.

Wang ve Li [36] tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada ele alınan HETD-ARP probleminde lojistik operasyonlarında karbon salınımını azaltmak amaçlanmaktadır. Problemden aynı zamanda zaman penceresi kısıtı da bulunmaktadır. Problemi çözmek için iki aşamalı hibrit bir sezgisel algoritma ele alınarak, ilk olarak müşterileri kümeleyerek başlangıç çözümünü oluşturmak için genetik algoritma kullanılmaktadır. İkinci aşamada ise değişken komşu arama algoritması kullanılmaktadır. Değişken komşu arama algoritması ile tavlama benzetimi birleştirilerek global en iyi çözüme ulaşmak amaçlanmaktadır.

Madankumar ve Rajendran [37] tarafından zaman pencereli HETD-ARP problemi ele alınmaktadır. Problemin çözümü için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilip, literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılarak çözüm elde etme süresinin geliştirildiği ortaya konmaktadır.

Nepomuceno, Saboia, Pinheiro [38] tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada HETD-ARP problemi için en yakın komşu stratejisini kullanan bir algoritma önerilmektedir. Sonuçlar, literatürdeki mevcut çözümler ile karşılaştırıldığında hem bulunan en iyi çözümlerin geliştirildiği hem de daha kısa sürede çözüm elde edilebildiğini göstermektedir.

Assuncao ve Santos [39] tarafından klasik HETD-ARP'den farklı olarak müşterilere kuryeler aracılığı ile hizmetin götürüldüğü bir problem ele alınmaktadır. Problemden araçlar müşterilere uğramak yerine belirli bir noktada durmakta ve müşterilere

hizmet kuryeler aracılığı ile ulaştırılmaktadır. Kurye kullanımı servis süresini azaltırken aynı zamanda operasyonel maliyeti de arttırmaktadır. Bu problem için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmektedir.

Keçeci, Altıparmak ve Kara [40] tarafından 2021 yılında bir başka çalışmada ise HETD-ARP problemi için MIP model önerilmektedir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü makul zamanda mümkün olmadığından, tavlama benzetimi ve yerel arama algoritmalarına dayalı meta sezgisel yöntem geliştirilerek sunulmaktadır. Küçük ve orta boyutlu problemler, matematiksel model ve meta sezgisel yöntem ile çözülüp, daha sonra en yakın komşu ve Clarke-Wright algoritmaları ile önerilen meta sezgisel yöntem karşılaştırılmaktadır.



3. HAVA ARAÇLARI ÜRETİMİ YAPAN BİR FİRMADA MALZEME TAŞIMA SİSTEMİ UYGULAMASI

Bu bölümde ilk olarak uygulamanın gerçekleştirildiği firma ve ele alınan sistemdeki taşıma işlemleri hakkında bilgi verilmektedir. Ardından çözüm yöntemi anlatılarak, deneysel çalışmalar ve uygulama sonuçları açıklanmaktadır.

3.1. Mevcut Durum ve Problem Tanımı

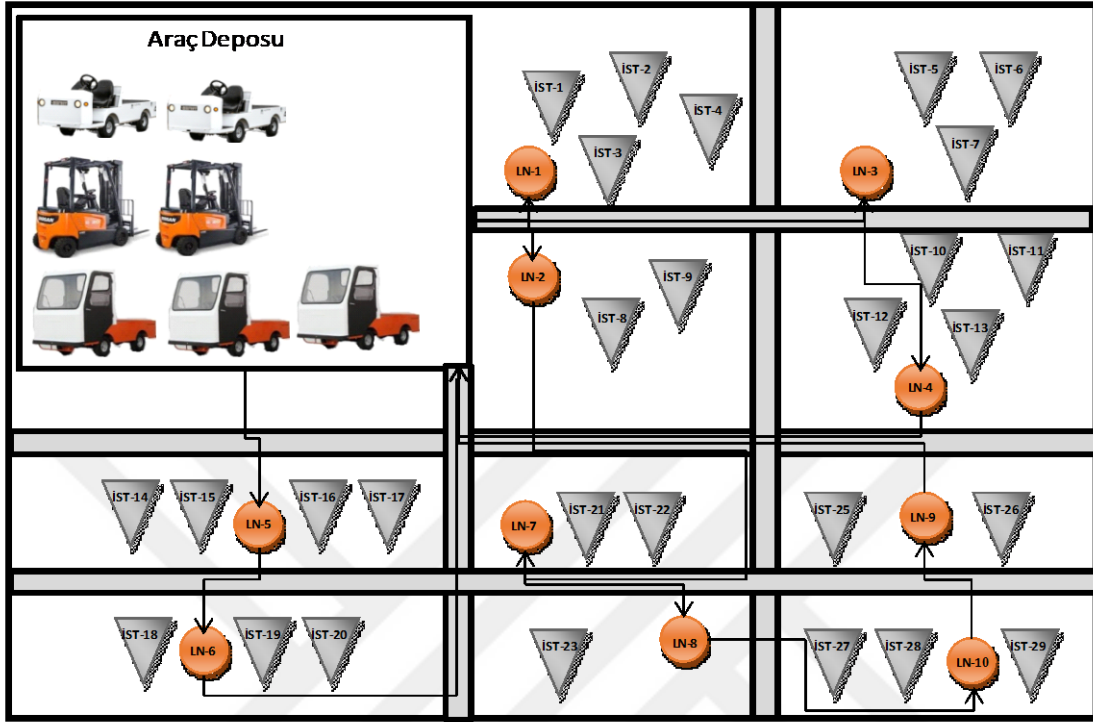
Günümüzde savunma sanayi sektörü ülkemiz ekonomisinde önemli role sahip hale gelmiştir. Hem ulusal hem uluslararası projeler kapsamında uçak ve helikopter gibi hava araçları üretimi gerçekleştiren firmalarda da, diğer sektörlerdeki firmalarda olduğu gibi müşteri memnuniyetinin sağlanmasından sonra ikinci sırada ürünlerin daha düşük maliyet ile üretilmesi amacı gelmektedir. Özellikle üretim yapan firmaların önemli maliyet kalemlerinden birini taşıma işlemleri oluşturmaktadır. Binalar arası parça taşıma işlemlerinin yoğun olmasına karşın, bu gibi firmalarda bina içi taşımaların sayısı da oldukça fazladır.

Çalışmanın yapıldığı firmada 4 milyon metrekaarelik bir tesiste farklı üretim yöntemleri ile hava aracı üretimi gerçekleştirilmektedir. Çalışma kapsamında farklı üretim yöntemleri ile farklı boyutlarda parçaların üretiminin yapıldığı bir binada iç lojistik birimi tarafından gerçekleştirilen bina içi parça taşıma işlemleri ele alınmaktadır.

Ele alınan sistemde parçaların rotaları ve iş merkezlerinin farklı kısıtları göz önüne alınarak oluşturulan üretim planları sonucunda, iş merkezlerinde hangi parçaların işleneceği bilgisi vardiya bazlı elde edilmektedir. Her vardiya başında, oluşturulan üretim planına göre taşınacak parçaların depoda sistemsel hazırlıkları tamamlanarak, kapasite açısından farklı özellikteki araçlardan müsait olanlara yüklenir. Depodan çıkan araçlar dağıtılacak parçaları lojistik noktalara bırakırlar. Lojistik noktalar, bir veya birden fazla iş merkezine hizmet eden, parçaların teslim edildiği ve teslim alındığı alanlar/masalardır. Şekil 3.1.'de birden fazla istasyona hizmet eden lojistik noktaları temsili olarak gösterilmiştir. Şekilde yer alan üçgenler istasyonları, yuvarlaklar ise lojistik noktalarını ifade etmektedir.

Bir önceki vardiyada, istasyonlarda işlemi biten parçalar, rotasındaki bir sonraki istasyonda işlem görmek için üretim planına dahil edilene kadar depoda tutulmaktadır. Bu nedenle dağıtma işlemi gerçekleştirilirken aynı zamanda lojistik noktalarda bulunan ve iş

merkezlerinde bir önceki vardiyada işlemi biten parçalar yine aynı araçlar ile depoya geri götürülmektedir. Yapılan bu dağıtım ve toplama işlemleri tek seferde gerçekleşmektedir.



Şekil 3.1. Uygulamanın Gerçekleştirildiği Firmada Mevcut Durumdaki Taşıma İşlemlerinin Temsili Gösterimi

Yapılan bu taşıma işlemlerinde, lojistik noktaları ziyaret edecek araçlar için yalnızca depodan çıkarken kapasite kontrolü yapılmakta, lojistik noktalardan alınacak parçalara yönelik ileriye dönük herhangi bir kapasite hesabı yapılmamaktadır. Bu nedenle herhangi bir lojistik noktaya uğrayarak işlemi biten parçaları teslim alacak araçların kimi zaman kapasitesi yetersiz kaldığından, bu lojistik nokta farklı bir araç tarafından da ziyaret edilmek zorunda kalabilmektedir. Bu ziyaret sonucunda bazı araçların gerekenden fazla lojistik noktaya uğramasından kaynaklı olarak zaman kayıpları ortaya çıkmaktadır.

Ele alınan taşıma işlemlerinde farklı özelliklere sahip araçlar kullanılmaktadır. Araçların kapasitesi alan cinsinden hesaplanmıştır. Oluşturulan tur boyunca teslim edilecek ve teslim alınacak parçaların alanları toplamı, aracın taşıma alan kapasitesinden fazla olmamalıdır.

Kapasite kontrolü, araç parça taşıma alanı kapasitesi ve parçaların alanları üzerinden yapıldığından, iş merkezlerinin dağıtım ve toplama talepleri de alan cinsinden elde edilmektedir.

Toplama ve dağıtım talepleri üretim planlarına göre oluştuğundan, yalnızca araçların rotaları boyunca kapasitesinin aşılması yeterli olmamakta aynı zamanda doğru parçanın doğru iş merkezine taşınması gerekmektedir.

Yüklerin bırakıldığı ve var olan yüklerin toplandığı lojistik noktaları, HETD-ARP tanımında yer alan müşterileri temsil etmektedir. Problemde 218 lojistik noktası bulunmaktadır.

Bazı araç tiplerinde parçalar direkt olarak aracın kasasına yerleştirilirken, bazı araç tiplerinde ise araçlar çekici görevi görmekte ve römork, sac arabası veya tahta araba gibi ek bir taşıyıcı vasıtası ile parçalar taşınmaktadır. Taşıyıcıların sayısının herhangi bir kısıt oluşturmadığı bilindiğinden, sayı kontrolü çekici görevi gören araçlar üzerinden yapılmaktadır. Problemde ele alınan araç tipleri, maksimum çekici adedi ve araçların alan cinsinden kapasite değerleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1 Uygulamada Ele Alınan Araç Bilgileri

Araç Tipi	Maksimum Adet	Kapasite (m^2)
Tip-1	20	3,8068
Tip-2	20	2,2816
Tip-3	20	2,1576
Tip-4	40	3,8068
Tip-5	20	2,1576
Tip-6	20	1,5750
Tip-7	20	2,2816

Bazı durumlarda gerçek hayat uygulamalarının tüm özelliklerini problemlere yansıtmak mümkün olmayabilir. Bu çalışmada da uygulamaya çözüm elde edebilmek için bazı varsayımlar yapılmıştır. Bu varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- Parçaların taşınması esnasında üst üste konmaya bağlı olarak çizilme gibi herhangi bir kalite hatası olmaması adına problemde, araçlara yüklenecek

parçaların üst üste konmadığı, parçaların her zaman araç taşıma yüzeyine temas edecek şekilde araca yüklendiği varsayılmaktadır.

- Araçlar için belirli aralıklar ile katlanılan bakım maliyetleri ihmal edilmektedir.
- Araçların satın alma maliyetlerini amorti ettikleri varsayılmaktadır. Bu nedenle sabit maliyetler 0 olarak alınmaktadır.

ARP, polinom süre içerisinde en iyi çözüme ulaşılması zor olan NP-HARD problem sınıfına girmektedir. Problemin karmaşıklığı ve boyutu arttıkça, matematiksel model ile makul süre içerisinde çözüm bulmak mümkün olmamaktadır. Keçeci ve ark [31] çalışmalarında HETD-ARP için geliştirilen ayrıt tabanlı matematiksel modelin 40 ve daha büyük boyutlu problemlerde, düğüm tabanlı matematiksel modelin ise 20 ve daha büyük boyutlu problemlerde makul süre içinde en iyi çözüme ulaşamadığını ifade etmektedirler. Uygulamada ele alınan problemin büyüklüğü, matematiksel model ile makul zamanda en iyi çözüme ulaşılabilen problem boyutlarından fazla olduğundan, meta sezgisel yöntem ile çözüm aranmaktadır.

En Yakın Komşu ve Clarke-Wright Tasarruf algoritmaları ARP için en çok önerilen çözüm kurucu sezgisellerden ikisidir. Tavlama Benzetimi, Tabu Arama Algoritması ve Genetik Algoritma da ARP için çözüm elde etmede sık kullanılan meta-sezgisel yöntemlerdir.

Bu bölümde çözüm için geliştirilen TB Algoritması hakkında genel bilgiler iletilmekte, geliştirilen algoritmanın etkinliğini test etmek için kullanılan test problemleri ve sonuçlarına yer verilmektedir. Ardından uygulamanın gerçekleştirildiği çevre hakkında bilgi verilmektedir. Son olarak çözüm aranan veri seti hakkında bilgi verilerek, algoritma sonuçları açıklanmaktadır.

3.2. Tavlama Benzetimi Algoritması

Tavlama benzetimi algoritması, optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan yaygın meta sezgisel yöntemlerden biridir. Kirkpatrick ve ark. [41] tarafından metallerin tavlama prosesi baz alınarak önerilmektedir. Tavlama işlemi düşük enerji ve güçlü kristal yapı elde etmek için metallerin, yüksek ısıya maruz kaldıktan sonra kademeli soğutulmasını ifade eder. Güçlü kristal yapının elde edilmesi, metalin soğutma hızına bağlıdır. Eğer başlangıç sıcaklığı yeteri kadar yüksek değilse veya soğutma hızlı şekilde gerçekleştirilirse kusurlu bir yapı elde edilir. Güçlü kristal yapı elde etmek için yavaş soğutma gerçekleştirilmelidir.

Tavlama benzetimi algoritmasında da metallerin tavlama işleminde olduğu gibi sıcaklık parametresi kademeli azaltılarak, optimum çözüme ulaşmak için iterasyonlar gerçekleştirilir.

Optimizasyon algoritmalarında bir başlangıç çözümünden başlanarak elde edilen komşu çözüm ile mevcut çözümün amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırılır. Eğer yeni elde edilen komşunun amaç fonksiyon değeri, mevcut çözümünkinden daha iyi ise, yeni komşu mevcut en iyi çözüm olarak belirlenir. Eğer daha iyi bir çözüm bulunamıyor ise algoritma sonlandırılır. Böyle bir prosedürün uygulanması halinde, yerel minimum veya yerel maksimum noktalara sıkışıp kalma olasılığı bulunmaktadır. Tavlama benzetimi algoritmasında, çözümün yerel optimum noktalarda sıkışması halinde, çözüm uzayında farklı bir noktaya gidebilmek amacı ile, soğutma prosedürü ve Metropolis kriteri kullanılmaktadır.

Tavlama benzetiminde, başlangıç çözümünden başlanarak çeşitli iterasyonlar gerçekleştirilir. Her iterasyonda rastgele komşular türetilir. Amaç fonksiyonunu iyileştiren her komşu çözüm kabul edilirken, amaç fonksiyonunu iyileştirmeyen bazı kötü çözümler de, amaç fonksiyonundaki değişim ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak (41) numaralı eşitlikteki Boltzmann dağılımına göre hesaplanan olasılıklar doğrultusunda kabul edilebilir. Formülde yer alan $f(s') - f(s)$ değeri, mevcut çözümün amaç fonksiyonu ile en iyi çözümün amaç fonksiyonu arasındaki farkı, T değeri mevcut sıcaklığı belirtmektedir.

$$P(\Delta E, T) = e^{-\frac{f(s') - f(s)}{T}} \quad (41)$$

Her iterasyonda sıcaklık parametresi azaltılarak her sıcaklık değerinde, belirlenen komşu sayısı kadar farklı komşu türetilir. Durdurma koşulu sağlanana kadar işlemler tekrar edilir.

Tüm meta sezgisel algoritmalarda olduğu gibi komşuluk tanımı ve başlangıç çözümünün üretilmesi, tavlama benzetiminin de tasarım konuları arasındadır. Tavlama benzetimi algoritmasında, başlangıç çözümü, kabul olasılık fonksiyonu, soğutma çizelgesi ve komşuluk yapısının belirlenmesi gerekmektedir.

3.2.1. Başlangıç Çözümü Üretme

Araç rotalama problemlerinde başlangıç çözümü elde etmede en çok kullanılan sezgisellerden biri, uygulaması kolay ve çözüm hızı yüksek olan En Yakın Komşu Algoritması'dır. En Yakın Komşu Algoritması'nın çalışma zamanı $O(n^2)$ 'ye bağlı polinom fonksiyondur. Bu algorithmada, her iterasyonda ziyaret edilmemiş düğümler arasından, bulunulan düğüme en yakın olan seçilerek tur oluşturmak hedeflenir. En Yakın Komşu Algoritması'nın genel kuralları aşağıdaki gibidir.

1. Her tur depoda başlar ve depoda sonlanır.
2. Her düğüm yalnızca bir kez ziyaret edilir.
3. Tur boyunca ziyaret edilen düğümlerin dağıtım (toplama) talepleri araç kapasitesini geçemez.
4. Eğer ziyaret edilecek düğümün dağıtım (toplama) talebi ile araçtaki yüklerin toplamı araç kapasitesini aşıyor ise bu düğüm ziyaret edilmez ve yeni bir tur oluşturulur.
5. Eğer tüm düğümler ziyaret edilmiş ise algoritma sonlanır.

Çalışmada yukarıda genel kuralları verilen En Yakın Komşu Algoritması, heterojen araç filosu ve eş zamanlı topla dağıt yaklaşımı eklenerek kullanılmaktadır. ETD-ARP'de ziyaret edilen düğümlere bırakılan yüklere ek olarak, düğümlerden de yük toplandığından, rota boyunca aracın kapasitesinin aşılp aşılmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle çözüm için, En Yakın Komşu Algoritması ile elde edilen turların uygunluk kontrolü yapılmaktadır.

Çalışmada uygulanan En Yakın Komşu Algoritmasının adımları Ek-1'de verilmektedir.

3.2.2. Kabul Olasılık Fonksiyonu

TB'de yerel optimum noktalardan kaçmak amacı ile amaç fonksiyonunu iyileştirmeyen komşular da belirli bir olasılık altında kabul edilir. Bu olasılık değeri mevcut sıcaklık (T) ve komşu çözümün amaç fonksiyonu değeri ile mevcut en iyi çözümün amaç fonksiyon değeri arasındaki fark (ΔE) parametrelerine bağlıdır. Elde edilen bu olasılık değeri, 0 ve 1 arasında düzgün dağılım gösteren rastgele bir R değerinden büyük ise, oluşturulan komşu çözüm, $P(\Delta E, T)$ olasılığı ile kabul edilmiş olur.

3.2.3. Soğutma Çizelgesi

Soğutma çizelgesi algoritmanın her stepinde belirlenen $T(i)$ sıcaklığı için tanımlanır. Başlangıç sıcaklığı, denge durumu, soğutma fonksiyonu ve durdurma koşulu parametreleri ile belirlenir.

3.2.3.1. Başlangıç Sıcaklığı

Başlangıç sıcaklığının yüksek seçilmesi, çözüm uzayındaki aramayı rastgele yerel aramaya dönüştürür. Bu nedenle seçilecek başlangıç sıcaklığı, belirli bir zaman aralığında rastgele arama yapacak kadar yüksek olmamalı, fakat farklı komşulara hareket etmeyi izin verecek kadar da yüksek olmalıdır.

Çalışmada üç farklı başlangıç sıcaklığı kullanılarak, başlangıç sıcaklığının değişiminin etkisi test problemleri aracılığı ile gözlemlenmektedir.

3.2.3.2. Denge Durumu

Her bir sıcaklık değerinde denge durumuna ulaşmak için, her sıcaklık değerinde yeterli sayıda hareket yapılması gerekir.

Çalışmada denge durumu, kabul edilen komşu sayısı üzerinden belirlenmektedir. İki farklı denge durumu parametresi kullanılarak, her sıcaklıkta kabul edilecek komşu sayısının etkisi test problemleri aracılığı ile gözlemlenmektedir.

3.2.3.3. Soğutma Fonksiyonu

TB’de sıcaklık her iterasyonda azalır. Sıcaklığın azalmasını sağlayacak soğutma fonksiyonu çözümün kalitesini etkiler. Sıcaklığın yavaş azaltılması daha fazla çözüm süresine sebep olsa da daha iyi sonuçlar elde edilir. Literatürde kullanılan bazı soğutma fonksiyonları aşağıda belirtilmiştir:

- Lineer Soğutma Fonksiyonu: β belirlenen sabit bir değer olmak üzere, $T_i = T_0 - i * \beta$ formülü ile hesaplanır.
- Geometrik Soğutma Fonksiyonu: α , (0,1) aralığında bir değer olmak üzere $T_i = \alpha * T$ formülü ile hesaplanır. Yapılan çalışmalarda α değerinin 0.5 ile 0.99 arasında olması gerektiği ortaya konmuştur.
- Logaritmik Soğutma Fonksiyonu: $T_i = T_0 / \log(i)$ formülü ile hesaplanır. Bu soğutma fonksiyonu pratikte uygulanamayacak kadar yavaş olsa da, global optimuma yakınsama özelliğine sahiptir.

Çalışmada geometrik soğutma fonksiyonu kullanılmaktadır. Yavaş soğutma ile çözüm uzayındaki farklı çözümlere ulaşabilmek amacı ile α değeri 0.999 olarak kullanılmaktadır.

3.2.3.4. Durdurma Koşulu

Algoritmayı sonlandırmak için literatürde kullanılan durdurma koşullarından bir tanesi sıcaklığın belirli bir final sıcaklığına ulaşmasıdır (T_f). Seçilecek final sıcaklığı düşük bir değer olmalıdır. Sıcaklık seçilen final değerine ulaştığında algoritma sonlandırılır. Diğer bir yöntem ise algoritmanın belirlenen bir iterasyon sayısına ulaşılmasıdır.

Çalışmada durdurma koşulu olarak final sıcaklığının 0.001 değerine büyük ya da eşit olması olarak kullanılmaktadır.

3.2.4. Komşuluk Yapısı

Tavlama benzetimi algoritmasında her sıcaklık değerinde belirlenen sayı kadar yeni komşu türetilir. Rastgele yeni komşular üretmek için literatürde yaygın olarak turlar arası ya da tur içi hareket mekanizmaları kullanılır.

3.2.4.1. Turlar Arası Hareket Mekanizmaları

Farklı turlar arasında çeşitli hareketler ile müşterilerin yerleri değiştirilerek yeni komşular türetilir.

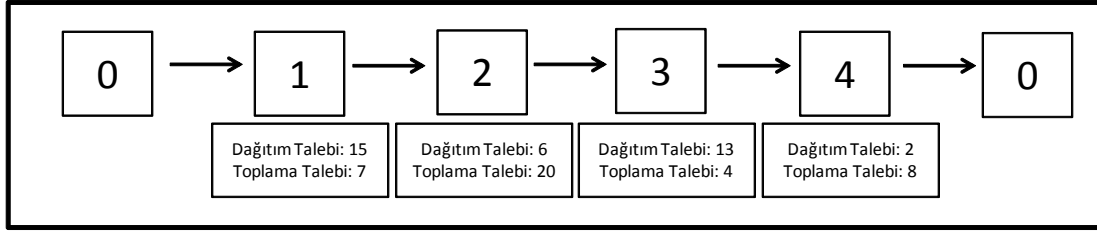
- 1-0 Kaydırma: Bir turdan seçilen herhangi bir müşteri bulunduğu turdan alınarak, farklı bir turun herhangi bir pozisyonuna yerleştirilir.
- 1-1 Yer Değiştirme: Bir turdan seçilen herhangi bir müşteri, farklı bir turdan seçilen bir müşteri ile yer değiştirir.
- k-Kaydırma: Bir turdaki ardışık k tane müşteri, seçilen farklı bir turun sonuna eklenir.
- Çaprazlama: Bir turdaki ardışık iki müşteri (m_1, m_2) arasındaki ve farklı bir turdaki ardışık iki müşteri (m_3, m_4) arasındaki bağlantı kopartılarak, m_1 - m_4 ve m_2 - m_3 müşterilerini bağlayan iki yeni ayrıt eklenir.

3.2.4.2. Tur İçi Hareket Mekanizmaları

Aynı tur içerisinde çeşitli hareketler ile müşterilerin yerleri değiştirilerek yeni komşular türetilir.

- Or-opt: Ardışık bir, iki veya üç müşteri turdan alınarak, turdaki rastgele belirlenen farklı bir pozisyona yerleştirilir.
- Tur İçi Yer Değiştirme: Bir turdaki iki müşterinin pozisyonları yer değiştirilir.
- Ters Çevirme: Turun tersten sıralanmasıdır. Bu yöntem eğer turda oluşan en büyük yük miktarı azaltılabilecek ise uygulanabilir.

Yapılan çalışmada farklı komşular elde etmek amacı ile 1-1 Yer Değiştirme hareketi kullanılmaktadır. Fakat ele alınan HETD-ARP'de eş zamanlı olarak toplama ve dağıtım işlemleri gerçekleştirildiğinden yukarıda bahsedilen hareket mekanizmaları kullanılarak elde edilen komşular için oluşan turların uygunluklarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle TB'de elde edilen her bir komşu için, yalnızca aracın depodan çıkarken sahip olduğu yüklerin araç kapasitesinden fazla olup olmadığının kontrolü yeterli olmamaktadır. HETD-ARP'nin özelliği gereği, rota boyunca da kapasite kontrolü yapılması gerekmektedir. Araçların depodan çıkarken kalan kapasiteleri, toplam kapasitelerinden uğrayacakları müşterilere dağıtacakları yüklerin toplamı kadar eksik olmaktadır. Uğranılan her bir müşteriye teslim edilen yük kadar araçta kalan kapasite artarken, toplama talebinin karşılanması ile araçtaki kalan kapasite toplanan yük miktarı kadar azalmaktadır. Aracın her bir müşteriye uğraması ile dağıtım ve toplama işlemlerinin gerçekleştirilmesi sonrası kalan kapasitesi sıfırdan büyük ya da sıfıra eşit ise oluşan tur uygundur. Tur uygunluğu Şekil 3.2'de örneklendirilmiştir. Kapasitesi 40 birim olan bir aracın depodan çıkarak aşağıdaki rotayı izleyeceği varsayalım. Böyle bir durumda aracın depodan çıkarken kalan kapasitesi $Q_{kalan} = 4$ birim olacaktır. İlk müşteriye uğradığında 15 birimlik talebi teslim ederek, 7 birimlik yükü toplayacaktır. Bu durumda $Q_{kalan} = 4 + 15 - 7 = 12$ birimlik kapasite ile ikinci müşteriye devam edecektir. İkinci müşteriye uğradığında ise 6 birimlik yükü teslim edecek ve 20 birimlik yük toplaması gerekecektir. $Q_{kalan} = 12 + 6 - 20 = -2$ olur. Yani araç ikinci müşteriye ziyaret ederek, ikinci müşterinin talebini teslim ettikten sonra bu müşteriden toplaması gereken yükü teslim aldığı anda araç kapasitesi aşılabilecektir. Bu durumda aracın turunun uygunluğu bozulmuş olacaktır.



Şekil 3.2. Tur Uygunluğu Örnek Gösterimi

Çalışmada uygulanan TB algoritmasında elde edilen komşulardan en az bir turun uygunluğunun bozuk olması durumunda elde edilen komşu kabul edilmez ve yeni bir komşu türetilir.

Geliştirilen çözümde belirlenen başlangıç sıcaklığından başlayarak, her sıcaklık değerinde önceden belirlenmiş sayıda komşu çözüm elde edilir. Eğer elde edilen komşu çözümlerin turları uygunluğu bozmuyor, yani araçların rotaları boyunca kapasiteleri aşılmıyor ise elde edilen çözümün maliyeti hesaplanır. Elde edilen maliyet, en iyi çözüme eşit ya da daha küçük ise elde edilen turlar en iyi çözüm olarak, elde edilen maliyet ise en iyi amaç fonksiyon değeri olarak kabul edilir. Elde edilen maliyet, en iyi çözümden daha büyük ise (41) eşitliğinde hesaplanan olasılık değerine göre çözüm olasılıklı kabul edilir ya da reddedilir. Her sıcaklık değerinde belirlenen komşu sayısına ulaşıldığında sıcaklık güncellenir. Durdurma koşulu sağlandığında ise algoritma sonlanır.

Çalışmada uygulanan TB algoritmasının adımları Ek-2’de gösterilmektedir.

3.3. Deneysel Çalışmalar ve Uygulama Sonuçları

Çalışmada geliştirilen TB algoritmasının etkinliğini test etmek amacı ile Keçeci ve ark [31] çalışmalarında kullanmış oldukları veri setlerinden yararlanılmaktadır. Kullanılan veri setlerine ait bilgiler Tablo 3.2’de verilmektedir. Yapılan testler Intel (R) Core i7-5500U CPU 2.40GHz 8,00 GB özelliklerine sahip bilgisayarda, DevC++ uygulaması kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Test problemleri için TB'nin etkinliği farklı parametre setleri ile ele alınmaktadır. Başlangıç sıcaklıkları 5000, 3000 ve 1000; her bir sıcaklıkta kabul edilmesi gereken komşu sayısı 500 ve 1000 olarak ele alınmaktadır. Durdurma koşulu ve soğutma çizelgesi sırasıyla $T \geq 0.0001$ ve $T = T * (0.999)$ olarak belirlenmektedir. Küçük boyutlu test problemlerinde her parametre seti algoritma 5 kez tekrarlanmaktadır. Tekrarlar sonucu ulaşılabilen optimum değer, optimum değere ulaşma süresi ve her bir problemin Keçeci ve

ark [29] çalışmalarında matematiksel model çözümü ile elde ettikleri en iyi çözümünden sapma oranları Tablo 3.3'de verilmektedir.

Tablo 3.2. Test Problemlerinin Özellikleri

Data_No	Node Sayısı	Araç Tipi	Her Tipteki Araç Sayısı	Kapasite	Sabit Maliyet
Data Set-1	20	1	1	20	20
		2	2	30	35
		3	1	40	50
		4	1	70	120
		5	1	120	225
Data Set-2	20	1	3	60	1000
		2	1	80	1500
		3	1	150	3000
Data Set-3	20	1	1	87	0
		2	1	44	0
		3	1	76	0
		4	1	74	0
		5	1	40	0

Tablo 3.3. Test Problemlerinin Sonuçları

Data	Başlangıç Sıcaklığı	Komşu Sayısı	Elde Edilen Değer	Çözüm Süresi (sn)	En İyi Çözüm	En İyi Çözümünden % Sapma
Data Set-1	5000	500	809,28	18,289	777,1074	%4,140
Data Set-1	3000	500	811,09	17,716	777,1074	%4,373
Data Set-1	1000	500	804,88	16,290	777,1074	%3,574
Data Set-1	5000	1000	808,23	32,427	777,1074	%4,005
Data Set-1	3000	1000	808,23	31,275	777,1074	%4,005
Data Set-1	1000	1000	808,23	28,388	777,1074	%4,005
Data Set-2	5000	500	7914,19	11,521	7809,1672	%1,345
Data Set-2	3000	500	7914,19	11,019	7809,1672	%1,345
Data Set-2	1000	500	7904,35	10,205	7809,1672	%1,219

Tablo 3.3. devam ediyor

Data Set-2	5000	1000	7904,35	21,787	7809,1672	%1,219
Data Set-2	3000	1000	7914,19	20,882	7809,1672	%1,345
Data Set-2	1000	1000	7914,19	20,680	7809,1672	%1,345
Data Set-3	5000	500	337,52	18,444	333,81	%1,110
Data Set-3	3000	500	337,52	17,425	333,81	%1,110
Data Set-3	1000	500	338,74	16,986	333,81	%1,476
Data Set-3	5000	1000	337,52	31,510	333,81	%1,110
Data Set-3	3000	1000	337,52	31,489	333,81	%1,110
Data Set-3	1000	1000	337,52	30,412	333,81	%1,110

Sonuçlar incelendiğinde ele alınan küçük boyutlu test problemlerinde farklı parametre değerleri için en iyi çözümden sapma oranının %1,110 ile %4,373 değerleri arasında değiştiği görülmektedir.

Parametre setlerinin değişimi ile elde edilen sapma oranları incelendiğinde, Data Set-1 için en düşük sapma oranı başlangıç sıcaklığı 1000 ve komşu sayısı 500 iken elde edilmektedir. Data Set-2 için en düşük sapma oranı başlangıç sıcaklığı 1000 ve komşu sayısı 500 iken aynı zamanda başlangıç sıcaklığı 5000 ve komşu sayısı 1000 iken elde edilmektedir. Data Set-3 için en düşük sapma oranına ise komşu sayısının 500 olduğu durumlar için 5000 ve 3000 başlangıç sıcaklıklarında ve komşu sayısı 1000 iken üç sıcaklık değerinde de en düşük sapma oranına ulaşıldığı gözlemlenmektedir.

Algoritmanın etkinliğini gözlemlemek amacı ile kullanılan test problemlerinde en iyi çözüme en yakın ve en kısa sürede elde edilen değer başlangıç sıcaklığı 3000 ve komşu sayısının 500 olduğu parametre setidir.

Problemin çözümü için uygulanan TB algoritmasının parametre seti, yukarıda bahsedilen test problemlerinde elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak belirlenmektedir. Test problemleri için en iyi parametre seti olarak kabul edilen, başlangıç sıcaklığı 3000 ve komşu sayısı 500 değerleri gerçek hayat verisinde kullanılmak üzere ele alınmaktadır.

Başlangıç çözümü elde etmek amacı ile uygulanan EYK algoritması ile bulunan maliyet 5040,00'dır. TB algoritması sonucunda ise ulaşılabilen en küçük maliyet 4830,00 olarak elde edilmiştir. Bu değere 3357,81 saniyede ulaşılmıştır. Elde edilen rotalar Tablo 3.4'de verilmektedir.

Tablo 3.4. Uygulama Sonucu Oluşan Rotalar

Araç Tipi	Oluşan Rota
Tip-1	0-212-0
Tip-1	0-62-22-82-14-106-152-127-80-156-114-0
Tip-1	0-115-47-144-119-99-149-72-116-100-41-103-160-60-0
Tip-1	0-28-154-6-36-34-0
Tip-1	0-50-10-45-58-29-0
Tip-1	0-13-137-55-23-33-68-15-0
Tip-1	0-121-74-0
Tip-1	0-18-139-71-112-157-43-12-150-113-90-92-0
Tip-1	0-75-7-111-158-101-104-16-96-132-0
Tip-1	0-63-8-143-31-65-141-26-0
Tip-1	0-84-135-42-117-124-14-46-95-66-122-79-59-89-73-120-67-86-37-52-140-134-53-57-110-17-49-123-94-98-102-69-153-32-56-70-88-30-77-0
Tip-1	0-130-129-40-48-146-44-155-151-38-109-107-118-39-83-20-0
Tip-1	0-133-148-125-27-0
Tip-1	0-159-21-61-24-0
Tip-1	0-87-76-108-91-136-0
Tip-1	0-64-19-85-0
Tip-1	0-128-35-105-5-0
Tip-1	0-215-0
Tip-1	0-138-54-25-161-142-9-97-0
Tip-1	0-81-11-0
Tip-2	0-147-131-0
Tip-2	0-78-126-0
Tip-2	0-51-93-0
Tip-4	0-169-0
Tip-4	0-183-19-0
Tip-4	0-181-178-0
Tip-4	0-199-187-0
Tip-4	0-192-0
Tip-4	0-185-0
Tip-4	0-205-207-186-0
Tip-4	0-171-0
Tip-4	0-201-0
Tip-4	0-194-173-0
Tip-4	0-176-182-200-0
Tip-4	0-189-170-0
Tip-4	0-174-190-0
Tip-4	0-184-202-0
Tip-4	0-204-177-0
Tip-4	0-172-168-0
Tip-4	0-197-193-0
Tip-4	0-198-175-0
Tip-4	0-208-196-0
Tip-4	0-209-191-188-0
Tip-4	0-206-167-0
Tip-4	0-203-179-0

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Artan nüfus ile birlikte tedarik, taşıma ve malzeme ihtiyaçları da arttığından, ihtiyaç duyulan ürünlerin istenilen konumlara ulaştırılabilmesi için gerçekleştirilen taşıma işlemlerinin daha da önem kazandığı görülmektedir. Tedarik zinciri faaliyetlerinde yalnızca üretim sonrası ürünlerin müşteriye ulaştırılması değil, fabrika içi parça, malzeme ve takım taşıma maliyetleri de göz ardı edilmemesi gereken gider kalemlerindendir. Firmaların maliyetlerini kontrol altına almak istemesi, büyük boyutlu gerçek hayat problemlerine çözüm üretme arayışını ortaya çıkarmaktadır. Farklı özelliklere sahip sistemlerdeki taşıma işlemlerinin incelenmesi sonucu farklı ARP türleri tanımlanmaktadır. Bu nedenle hem gerçek hayatta hem akademik alanda ARP türleri ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmış ve yeni ihtiyaçların ortaya çıkmasından kaynaklı olarak yapılmaya da devam edilmektedir.

Taşınacak ürün gruplarının farklılaşması sonucu taşıma işlemlerinde hız, kapasite, satın alma maliyeti, ulaştırma maliyeti gibi farklı özelliklere sahip araç kullanımı ihtiyacı ortaya çıkmakta ve bu nedenle son yıllarda HARP üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır. Aynı zamanda geri dönüşüm işlemleri, bitmiş ürünlerin müşterilerden toplanarak tekrar değerlendirilmesi amacı ile müşterilerin dağıtım ve toplama taleplerinin eş zamanlı olarak karşılanması da araştırmacıların ETD-ARP konularına daha fazla eğilmelerini sağlamaktadır.

Çalışmada incelenen sistemin taşıma işlemlerinde farklı kapasitedeki araçlar kullanılmakta ve müşteri arz ve talepleri aynı anda karşılanmaktadır. Bu nedenle ele alınan problemin HETD-ARP olduğu ortaya konmuştur.

Tez kapsamında incelenen sistemin boyutu, daha önce yapılan çalışmalarda matematiksel model ile makul süre içinde en iyi çözüme ulaşılabilen problem boyutundan daha büyük olduğundan TB algoritması ile çözüm araştırılmıştır. Algoritmanın etkinliğini ölçmek amacı ile en iyi çözümü bilinen küçük boyutlu test problemleri kullanılmıştır. Ardından gerçek hayat verisi ile taşıma işlemlerine çözüm geliştirilmiştir. Elde edilen çözüm, çıktılara zaman boyutunun eklenmesi ile çalışmada ele alınan sistemde yer alan iş merkezlerine yönelik yapılacak bir çizelgeleme çalışmasına girdi olacaktır. Araçların depodan belirli saatlerde çıkması ile, rota boyunca her bir lojistik noktaya uğrayacakları zamanlar tespit edilerek, taşınacak parçaların iş merkezlerinde hazır bulunacakları zaman

belirlenecek, böylece belirlenen bu zaman çizelgeleme çalışmalarında konu parçanın ilgili iş merkezinde çizelgelenebileceği en erken zaman olacaktır.

Bu çalışmanın devamında farklı meta-sezgisel yöntemler ile taşıma işlemlerine çözüm üretilmeye, tek vardiya için gözlemlenen sistem için günlük üretim planları ele alınarak araç rotaları elde edilmeye çalışılabilir. Ayrıca, araçların ve parçaların üçüncü boyutlarının da göz önüne alınarak kapasite kontrolü hacim üzerinden gerçekleştirilebilir. Bunun yanı sıra, lojistik noktaların dağıtım ve toplama taleplerinin farklı araçlar tarafından parçalı olarak karşılandığı problem tipi de konu sistem için ele alınabilir.



5. KAYNAKLAR

- [1] T.C. Ticaret Bakanlığı Uluslararası Anlaşmalar ve Avrupa Birliği Genel Müdürlüğü, “Federal Almanya Pazar Bilgileri,” 2022. [Online]. Available: [https:// ticaret.gov.tr /data/5ebd2bb913b876cbbc365233/Almanya%20Pazar%20Bilgileri_2022.pdf](https://ticaret.gov.tr/data/5ebd2bb913b876cbbc365233/Almanya%20Pazar%20Bilgileri_2022.pdf).
- [2] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, “The Truck Dispatching Problem,” *Management Science*, vol. 6 no. 1, pp.80-91, Oct. 1959.
- [3] H. Min, “The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points,” *Transportation Research Part A: General*, vol. 23 no. 5, pp.377-386, 1989, doi: 10.1016/0191-2607(89)90085-X.
- [4] J. Dethloff, “Vehicle Routing and Reverse Logistics: The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-Up,” *OR-Spektrum*, vol.23 no. 1, pp.79-96, 2001, doi: 10.1007/PL00013346.
- [5] J. Crispim and J. Brandão, “Metaheuristics applied to mixed and simultaneous extensions of vehicle routing problems with backhauls,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 56 no. 11, pp.1296-1302, 2005, doi: 10.1057/palgrave.jors.2601935.
- [6] F.A.T Montane and R.D Galvao, “A Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-Up and Delivery Service,” *Computers & Operations Research*, vol. 33, pp.595-619, 2006, doi: 10.1016/j.cor.2004.07.009
- [7] M. Dell'Amico, G. Righini and M. Salani, “A Branch-and-Price Approach to the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Distribution and Collection,” *Transportation Science*, vol. 40 no. 2, pp.235-247, 2006, doi: 10.1287/trsc.1050.0118.
- [8] N. Bianchessi and G. Righini, “Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery,” *Computers & Operations Research*, vol. 34 no. 2, pp.578-594, 2007, doi: 10.1016/j.cor.2005.03.014.

- [9] T.J. Ai and V. Kachitvichyanukul, "Particle swarm optimization and two solution representations for solving the capacitated vehicle routing problem," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 56 no. 1, pp.380-387, 2009, doi: 10.1016/j.cie.2008.06.012.
- [10] E. Zachariadis, C.D. Tarantilis and C.Kiranoudis, "A hybrid metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up service," *Expert Systems with Applications*, vol.25 no. 2, pp.1070-1081, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2007.11.005.
- [11] Y. Gajpal, P. Abad, "An ant colony system (ACS) for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup," *Computers & Operations Research*, vol. 36 no. 12, pp.3215–3223, 2009, doi: 10.1016/j.cor.2009.02.017.
- [12] E. Zachariadis, C.D. Tarantilis and C.Kiranoudis, "An adaptive memory methodology for the vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries," *European Journal of Operational Research*, vol. 202 no. 2, pp.401-411, 2010, doi: 10.1016/j.ejor.2009.05.015.
- [13] F.P. Goksal, I. Karaoğlu, F. Altıparmak, "A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 65 no. 1, pp.39-53, 2013, doi: 10.1016/j.cie.2012.01.005.
- [14] E. Zachariadis, C.D. Tarantilis and C.Kiranoudis, "A local search metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries," *Expert Systems with Applications*, vol. 38 no. 3, pp.2717-2726, 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2010.08.061.
- [15] M. Avci and S. Topaloglu, "An Adaptive Local Search Algorithm for Vehicle Routing Problem with Simultaneous and Mixed Pickups and Deliveries," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 83, pp.15-29, 2015, doi: 10.1016/j.cie.2015.02.002.

- [16] O. Belgin, I. Karaoglan and F. Altiparmak, "Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and heuristic approach," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 115, pp.1-16, 2018, doi: 10.1016/j.cie.2017.10.032.
- [17] R. Hornstra, A. Silva, K.J. Roodbergen and L.C. Coelho, "The vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery and handling costs," *Computers & Operations Research*, vol. 115, 2020, doi: 10.1016/j.cor.2019.104858.
- [18] P. Sinruk and Y. Tangmo, "Heterogeneous fleet vehicle routing problem for retail construction material stores," *2017 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications*, 2017.
- [19] D. Kirby, "Is Your Fleet the Right Size?," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 10 no. 4, pp.252, 1959, doi: doi.org/10.1057/jors.1959.25.
- [20] M. Gendreau, F. Guertin, J. Potvin and E.D. Taillard, "Parallel Tabu Search for Real-Time Vehicle Routing and Dispatching," *Transportation Science*, vol. 33 no. 4, pp.381-390, 1999, doi: 10.1287/trsc.33.4.381.
- [21] C.M.R.R. Lima, M.C. Goldbarg, E.F.G. Goldbarg, "A Memetic Algorithm for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem," *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 18, pp.171-176, 2004, doi: 10.1016/j.endm.2004.06.027.
- [22] R. Dondo and J. Cerda, "A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows," *European Journal of Operational Research*, vol. 176 no. 3, pp.1478-1507, 2007, doi: 10.1016/j.ejor.2004.07.077.
- [23] E. Choi and D. Tcha, "A column generation approach to the heterogeneous fleet vehicle routing problem," *Computers & Operations Research*, vol. 37 no. 7, pp.2080-2095, 2007, doi: 10.1016/j.cor.2005.08.002.

- [24] F. Li, B. Golden and E.Wasil, "A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehicle routing problem," *Computers & Operations Research*, vol. 34 no. 9, pp.2734-2742, 2007, doi: 10.1016/j.cor.2005.10.015.
- [25] A. Imran, S. Salhi and N.A. Wassan, "A variable neighborhood-based heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 197 no. 2, pp.509-518, 2009, doi: 10.1016/j.ejor.2008.07.022.
- [26] C. Prins, "Efficient Heuristics for the Heterogeneous Fleet Multitrip VRP with Application to a Large-Scale Real Case," *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, vol. 1 no. 2, pp.135-150, 2002, doi: 10.1023/A:1016516326823.
- [27] A. Bettinelli, A. Ceselli and G. Righini, "A branch-and-cut-and-price algorithm for the multi-depot heterogeneous vehicle routing problem with time windows," *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, vol. 19 no. 5, pp.723-740, 2011, doi: 10.1016/j.trc.2010.07.008.
- [28] J. Brandão, "A tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem," *Computers & Operations Research*, vol. 38 no. 1, pp.140-151, 2011, doi: 10.1016/j.cor.2010.04.008.
- [29] Y. Xu, L. Wang and Y. Yang, "A New Variable Neighborhood Search Algorithm for the Multi Depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 39, pp.289-296, 2012, doi: 10.1016/j.endm.2012.10.038.
- [30] C. Koc, T. Bektas, O. Jabali and G. Laporte, "Thirty years of heterogeneous vehicle routing," *European Journal of Operational Research*, vol. 249 no. 1, pp.1-21, 2016, doi: 10.1016/j.ejor.2015.07.020.
- [31] B. Keçeci, F. Altıparmak and I. Kara, "Heterojen Eş-Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi: Matematiksel Modeller ve Sezgisel Bir Algoritma," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 30 no. 2, 2015, doi: 10.17341/gummfd.48863.

- [32] H.M. Alağaç, S. Çetin, A. Yerlikaya and T. Eren, "Heterojen Eş-Zamanlı Topla-Dağıt Rotalama Problemi: Tehlikeli Malzeme Sevkiyatı," *4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Antalya, Turkey, 3-5 November 2016.
- [33] M. Avcı and S. Topaloglu, "A hybrid metaheuristic algorithm for heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery," *Expert Systems with Applications*, vol. 53, pp.160-171, 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2016.01.038.
- [34] B. Keçeci, F. Altıparmak and I. Kara, "The heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: A hybrid heuristic approach based on simulated annealing," *CIE44 & IMSS'14 Proceedings*, pp. 412-423, Istanbul, Turkey, 14-16 October 2014.
- [35] L. Li, T. Li, K. Wang, S. Gao, Z. Chen and L. Wang, "Heterogeneous fleet electric vehicle routing optimization for logistic distribution with time windows and simultaneous pick-up and delivery service," *16th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*, Shenzhen, China, 13-15 July 2019.
- [36] X. Li, X. Wang, " Carbon reduction in the location routing problem with heterogeneous fleet, simultaneous pickup-delivery and time windows," *Procedia Computer Science*, vol.112, pp.1131-1140, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.08.147.
- [37] S. Madankumar and C. Rajendran, "A mixed integer linear programming model for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup by heterogeneous vehicles, and constrained by time windows," *Sādhanā*, vol. 44, 2018, doi: 10.1007/s12046-018-1048-y.
- [38] N. Nepomuceno, R.B. Saboia and P.R. Pinheiro, "A Fast Randomized Algorithm for the Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery," *Algorithms*, vol. 12 no. 8, pp.158, 2019, doi: 10.3390/a12080158.

[39] M.A.F. de Assuncao and M.O. dos Santos, “The Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Multiple Deliverymen and Simultaneous Pickup and Delivery,” *51st Brazilian Symposium on Operations Research*, Limeira, Brazil, 2-6 September 2019.

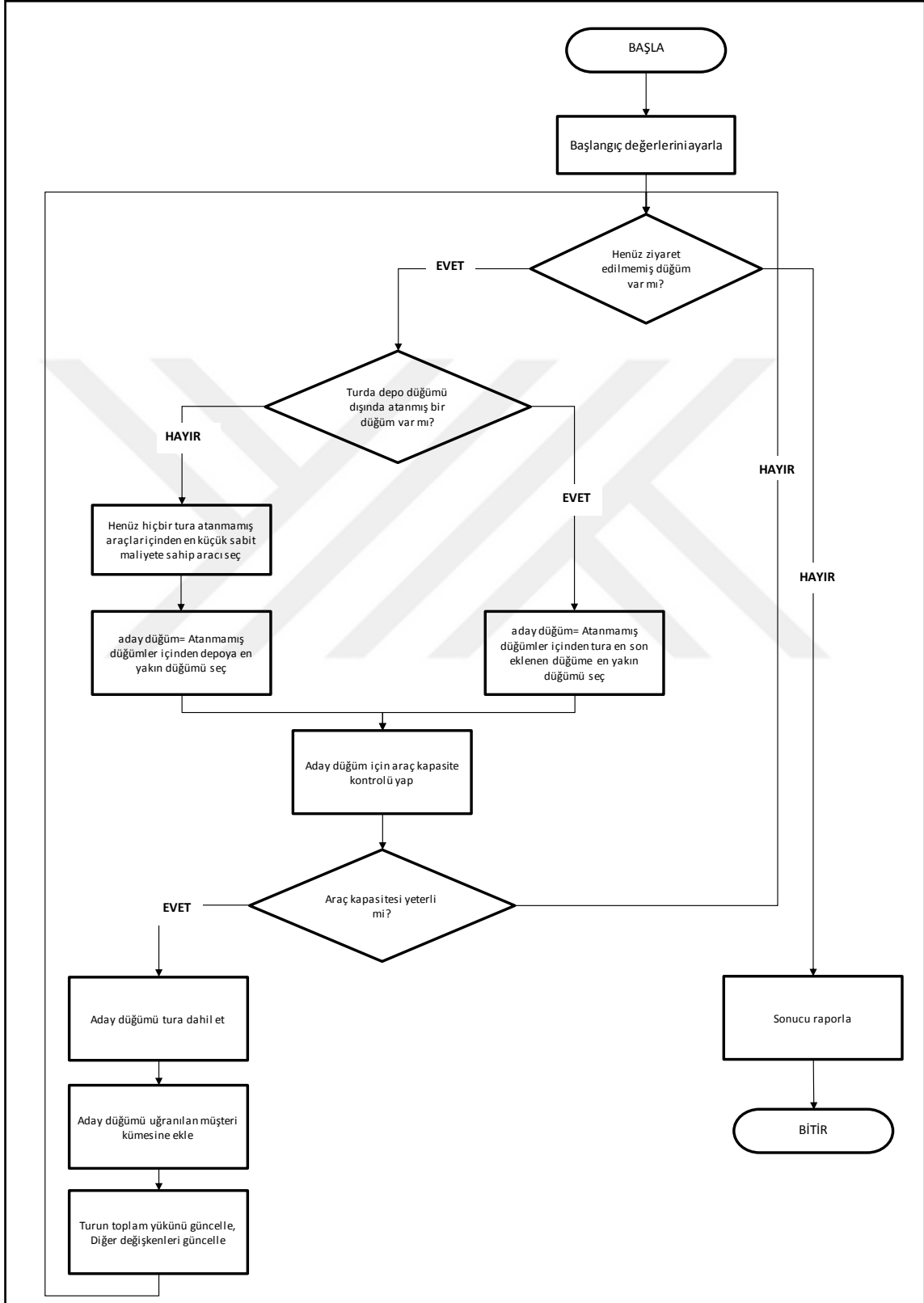
[40] B. Keçeci, F. Altıparmak and I. Kara, “A mathematical formulation and heuristic approach for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery,” *Journal of Industrial and Management Optimization*, vol. 17 no. 3, pp.1069-1100, 2021, doi: 10.3934/jimo.2020012.

[41] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi, “Optimization by Simulated Annealing,” *Science*, vol. 220 no. 4598, pp.671-680, 1983, doi: 10.1126/science.220.4598.671.



EKLER

EK-1 En Yakın Komşu Algoritması Adımları



EK-2 Tavlama Benzetimi Algoritması Adımları

