

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

ENGEL İÇEREN ORTAMLARDA KAPASİTE

SINIRLI ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNE

METASEZGİSEL ALGORİTMALARLA

ÇÖZÜM YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

Mehmet KARAKOÇ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aybars UĞUR

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 08.02.2016

Bornova-İZMİR

2016

MEHMET KARAKOÇ tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak sunulan “**ENGEL İÇEREN ORTAMLARDA KAPASİTE SINIRLI ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNE METASEZGİSEL ALGORİTMALARLA ÇÖZÜM YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve **08.02.2016 tarihinde** yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	: Prof. Dr. Aybars UĞUR	
Raportör Üye	: Prof. Dr. Serdar KORUKOĞLU	
Üye	: Y. Doç. Dr. Doğan AYDIN	
Üye	: Y. Doç. Dr. Hasan BULUT	
Üye	: Y. Doç. Dr. Korhan KARABULUT	

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum **“ENGEL İÇEREN ORTAMLARDA KAPASİTE SINIRLI ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNE METASEZGİSEL ALGORİTMALARLA ÇÖZÜM YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ”** başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

08 / 02 / 2016

İmzası

Mehmet KARAKOÇ

ÖZET**ENGEL İÇEREN ORTAMLARDA KAPASİTE
SINIRLI ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNE
METASEZGİSEL ALGORİTMALARLA
ÇÖZÜM YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ****KARAKOÇ, Mehmet****Doktora Tezi, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı****Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aybars UĞUR****Şubat 2016, 129 sayfa**

Kapasiteli araç rotalama probleminde, her biri özdeş ve belirli kapasiteye sahip bir araç filosu için en uygun rota kümesini bulmak hedeflenir. Araçlar, merkezî bir depodan hareket eder, bir dizi müşteriye hizmet verir ve bu depoya geri dönerler. Bu işlemin, en az sayıda araçla ve en az maliyetle gerçekleştirilmesi amaçlanır. Engellerin bulunduğu ortamlar için literatürde değişik yol planlama problemlerine yönelik yakın tarihli çalışmalar mevcuttur. Bu tezde ise engel içeren ortamlarda kapasite sınırlı araç rotalama problemi ilk kez ele alınmaktadır.

Problemin tanımlanması ve modelin oluşturulmasından sonra, çözüm için genetik algoritmalar ve yerel arama stratejilerinden oluşan melez meta-sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Depo-müşteri konumlarına ek olarak, daireler ve dışbükey çokgenler olarak iki farklı türdeki engellerin de eklenebildiği görsel bir benzetim ortamı oluşturulmuştur. Geliştirilen algoritma, tasarlanan çeşitli senaryolar için test edilmiştir. Farklı müşteri, engel sayıları ve engel büyüklükleri için kapsamlı başarımlar testleri literatürde ilk kez yapılarak, elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Ayrıca, problemin bu özel şeklinin potansiyel uygulama alanları tartışılmıştır.

Anahtar sözcükler: Kapasiteli araç rotalama problemi, engel içeren ortamlar, genetik algoritmalar, yerel arama, eniyileme, meta-sezgisel yöntemler, benzetim.



ABSTRACT**DEVELOPING A SOLUTION METHOD TO CAPACITY CONSTRAINED
VEHICLE ROUTING PROBLEM FOR THE ENVIRONMENTS WITH
OBSTACLES USING METAHEURISTIC ALGORITHMS****KARAKOÇ, Mehmet****PhD in Computer Eng.****Supervisor: Prof. Dr. Aybars UĞUR****February 2016, 129 pages**

In capacitated vehicle routing problem, it is targeted to find the optimum set of routes for a fleet of vehicles in which each one is identical with a certain capacity. These vehicles start at a central depot, serve a set of customers and return back to this depot. It is aimed to realize this operation with the minimum number of vehicles and the minimum cost. There are recent studies intended for different path planning problems for the environments in which obstacles exist in literature. In this thesis, on the other hand, capacity constrained vehicle routing problem for the environments with obstacles is addressed for the first time.

After the problem was defined and a model was created, a hybrid meta-heuristic method that consists of genetic algorithms and local search strategies was developed for the solution. A visual simulation tool was implemented in which two different types of obstacles as circles and convex polygons may be added in addition to depot-customer locations. The algorithm developed was tested for various scenarios designed. Comprehensive performance tests were conducted for different numbers of customers and obstacles, and obstacle sizes for the first time in literature, and the results obtained were presented. Additionally, potential application areas of this particular form of the problem were discussed.

Keywords: Capacitated vehicle routing problem, environments with obstacles, genetic algorithms, local search, optimization, metaheuristics, simulation.

x





TEŞEKKÜR

Tez çalışmam kapsamında, değerli yardımları için tez danışmanım Prof. Dr. Aybars Uğur'a, önemli katkıları için tüm tez jüri üyesi hocalarıma ve Y. Doç. Dr. Tahir Emre Kalaycı'ya; tüm manevi destekleri için değerli hocalarıma, öğrenci arkadaşlarıma, yakınlarıma ve çalışma arkadaşlarıma; bu süreçteki tüm desteği ve katkısı için ayrıca Doç. Dr. Melih Günay'a; kıymetli aileme ve özellikle Annem Ayten Karakoç'a gönülden teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	VII
ABSTRACT	IX
TEŞEKKÜR	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XX
ÇİZELGELER DİZİNİ	XXIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XXVI
1. GİRİŞ	1
2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ	6
2.1 Problemin Tanımı ve Bileşenleri	6
2.2 Problemin Türleri.....	9
2.3 Kapasiteli Araç Rotalama Problemi.....	12
2.3.1 Probleme ve problemin çözümüne ilişkin model	14
2.3.2 Probleme ilişkin bir örnek	15
2.4 Problemin Çözümü için Kullanılan Yöntemler	16
3. META-SEZGİSEL YÖNTEMLER VE GENETİK ALGORİTMALAR.....	19

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.1 Sezgisel Yöntemler	19
3.2 Meta-Sezgisel Yöntemler	20
3.3 Genetik Algoritmalar.....	22
3.3.1 Klasik yöntemlerden farkı	23
3.3.2 Gösterim	24
3.3.3 Başlangıç nüfus	24
3.3.4 Uygunluğun değerlendirilmesi.....	25
3.3.5 Seçim	25
3.3.6 Çaprazlama	27
3.3.7 Mutasyon	28
3.3.8 Seçkincilik ve yeniden üretim.....	28
3.3.9 Sonlanma ölçütü.....	29
3.3.10 Uygulama alanları	29
3.4 Yerel Arama Stratejileri	29
3.4.1 Yinelemeli yerel arama.....	31

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.4.2 Kılavuzlu yerel arama	31
3.5 Melez Yaklaşımlar	32
4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	33
4.1 Engel İçermeyen Ortamlara İlişkin Yapılmış Çalışmalar	33
4.2 Rotalama Problemlerine İlişkin Özel Durumlar	43
4.3 Yol Planlamada Engellerden Kaçma Çalışmaları.....	46
4.4 Noktadan Noktaya En Kısa Yolu Bulma Çalışmaları.....	53
4.5 Diğer Çalışmalar	56
4.6 Tez Çalışmasının Literatürdeki Diğer Çalışmalardan Farkı.....	58
5. ENGEL İÇEREN ORTAMLARDA KAPASİTELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ VE GENEL ÇÖZÜM YÖNTEMİ	60
5.1 Problemin Tanımı	60
5.2 Araç Rotalama Probleminin Dairesel ve Çokgensel Engeller İçeren Ortamlara Uyarlanması	62
5.2.1 Probleme ilişkin genel çözüm yöntemi	63
5.2.2 Müşteri çiftleri için ara uzaklık matrislerinin oluşturulması	64

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.2.3 Nihai uzaklık matrisinin oluşturulması	66
5.3 Genetik Algoritmalar ve Yerel Arama Tabanlı Eniyileme.....	67
5.3.1 Gösterim	68
5.3.2 Başlangıç nüfus	68
5.3.3 Uygunluğun değerlendirilmesi.....	69
5.3.4 Seçim	69
5.3.5 Genetik işlemler	69
5.3.6 Yerel arama	70
5.3.7 Bir sonraki neslin oluşturulması	71
5.3.8 Sonlanma ölçütü.....	71
6. DAİRESEL ENGELLER İÇEREN ORTAMLARDA KILAVUZ NOKTALARI KULLANILARAK KAPASİTELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ	72
6.1 Dairesel Engeller İçeren Ortam	72
6.2 Dairesel Engeller için Ortama İlişkin Kesişmeler.....	73
6.3 Dairesel Engeller İçeren Ortamlar için Çözüm.....	74

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.4 Dairesel Engeller İçeren Ortamlar için Deneysel Çalışmalar	75
6.4.1 Veri kümesi ve deneysel kurulum.....	75
6.4.2 Yöntemin engel içermeyen ortamlarda test edilmesi	77
6.4.3 Dairesel engellerin yerleştirilmesi	78
6.4.4 Farklı müşteri sayıları için deneyler.....	82
6.4.5 Ortamın farklı engel doluluk oranları için deneyler	84
7. ÇOKGENSEL ENGELLER İÇEREN ORTAMLARDA KÖŞE NOKTALARI KULLANILARAK KAPASİTELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ	89
7.1 Çokgensel Engeller İçeren Ortam.....	89
7.2 Çokgensel Engeller için Ortama İlişkin Kesişmeler	89
7.3 Çokgensel Engeller İçeren Ortamlar için Çözüm.....	91
7.4 Çokgensel Engeller İçeren Ortamlar için Deneysel Çalışmalar	93
7.4.1 Çokgensel engellerin yerleştirilmesi.....	94
7.4.2 Farklı müşteri sayıları için deneyler.....	94
7.4.3 Ortamın farklı engel doluluk oranları için deneyler	97

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

7.4.4 VRPLIB örneği üzerinde düzensiz engel yerleşimi için deneyler	103
8. BULGULAR.....	106
9. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	108
10 ÖNERİLER.....	110
KAYNAKLAR DİZİNİ	112
ÖZGEÇMİŞ.....	129
EKLER.....	



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Basit bir CVRP çözümü örneği (36 müşteri için).	13
5.1 Engel içeren bir ortamda, kılavuz noktaları ile belirlenen en kısa yol.	61
5.2 Engel içeren bir ortamda, köşe noktaları ile belirlenen en kısa yol.	62
5.3 Engel içeren ortamlarda CVRP çözümüne ilişkin yöntemin akış şeması.	63
5.4 Engel içeren bir ortamda, C1-C2 müşteri çifti arasındaki en kısa yol: (a) dairesel ve (b) çokgensel birer engel için.	65
5.5 Geliştirilen GA tabanlı melez meta-sezgisel algoritmaya ilişkin akış şeması.	67
6.1 Çember ile doğru arasındaki durumlar.	73
6.2 Dairesel engeller içeren bir ortamda CVRP çözümü (iki rota için).	75
6.3 Ortamda 25 müşteri, 100 engel ve 121 kılavuz noktası mevcut olup; tüm talepler tek rotada karşılanmaktadır.	83
6.4 Farklı müşteri sayıları için toplam rota uzunlukları.	84
6.5 Ortamda 100 müşteri, 30 (3×10) engel ve 44 kılavuz noktası mevcut olup; tüm talepler dört rotada karşılanmaktadır.	85
6.6 Farklı engel sayıları için toplam rota uzunlukları.	86
6.7 Ortamda 100 müşteri, 100 engel ve 121 kılavuz noktası mevcut olup; tüm talepler iki rotada karşılanmaktadır.	87
6.8 Farklı engel büyüklükleri için toplam rota uzunlukları.	88

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.1 Karesel engeller içeren bir ortamda CVRP çözümü (iki rota için).....	91
7.2 Altıgensel engeller içeren bir ortamda CVRP çözümü (iki rota için).....	92
7.3 (a) dışbükey kabuk oluşturma ve en kısa yolu bulma örneği ve (b) iki nokta arasında, engele ait köşeler üzerinden hareket edilmesi.	93
7.4 Ortamda 25 müşteri, 100 engel ve (a) kareler için 400 ve (b) altıgenler için 600 kılavuz noktası mevcut olup; tüm talepler tek rotada karşılanmaktadır.	95
7.5 Farklı müşteri sayıları için toplam rota uzunlukları.....	96
7.6 Ortamda 100 müşteri, 30 (3×10) engel ve (a) kareler için 120 ve (b) altıgenler için 180 kılavuz noktası mevcut olup; tüm talepler dört rotada karşılanmaktadır.	98
7.7 Farklı engel sayıları için toplam rota uzunlukları.....	99
7.8 Ortamda 100 müşteri, 100 engel ve (a) kareler için 400 ve (b) altıgenler için 600 kılavuz noktası mevcut olup; tüm talepler iki rotada karşılanmaktadır.	101
7.9 Farklı engel büyüklükleri için toplam rota uzunlukları.	102
7.10 Engel içeren-içermeyen ortamlara ilişkin çözümdeki değişim: (a) engel içermeyen ve (b) engel içeren aynı ortamda deney.	104
7.11 Engel içeren ortama ilişkin çözümdeki değişim.	105



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Örnek bir CVRP'ye ilişkin bilgiler.	15
3.1 Bit tabanlı gösterim için çaprazlama işlecinin uygulanması.	27
3.2 Bit tabanlı gösterim için mutasyon işlecinin uygulanması.	28
3.3 2-opt algoritmasının uygulanması.	30
4.1 Tez çalışmasının literatürdeki benzer ve yakın çalışmalarla karşılaştırılması.	59
5.1 Engeller içeren ortamda iki nokta arasındaki uzaklığı hesaplayan sözde kod.	65
5.2 C1-C2 müşteri çifti için oluşturulan ara uzaklık matrisi.	66
5.3 Nihai uzaklık matrisi.	67
5.4 GA tabanlı yöntem kapsamında uygulanan 2-opt algoritmasının sözde kodu.	71
6.1 İki nokta arasındaki potansiyel hat üzerindeki dairesel engelleri tespit eden sözde kod.	74
6.2 GA tabanlı yöntemin değişkenleri ve varsayılan değerler.	76
6.3 TSP çözümüne ilişkin sonuçlar.	77
6.4 Engel içermeyen ortamlarda CVRP çözümüne ilişkin sonuçlar.	78
6.5 Dairesel engelleri üreten yöntemin sözde kodu.	79
6.6 Kılavuz noktalarını üreten yöntemin sözde kodu.	80

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.7 Dairesel engeller içeren ortamlarda CVRP'yi çözen yöntemin sözde kodu. ..	81
6.8 Deneylerde elde edilen sonuçlara ilişkin olarak kullanılan terimler.	82
6.9 Sabit engel sayısı-büyüklüğü ile müşteri sayısının değişimi.	83
6.10 Sabit müşteri sayısı ve engel büyüklüğü ile engel sayısının değişimi.	85
6.11 Sabit müşteri ve engel sayıları ile engel büyüklüğünün değişimi.	87
7.1 İki nokta arasındaki potansiyel hat üzerindeki dışbükey çokgensel engelleri tespit eden sözde kod.	90
7.2 Müşteri sayısının değişimi deneylerine ait kurulum.	94
7.3 Sabit engel sayısı-büyüklüğü ile müşteri sayısının değişimi.	96
7.4 Engel sayısının değişimi deneylerine ait kurulum.	97
7.5 Sabit müşteri sayısı ve engel büyüklüğü ile engel sayısının değişimi.	99
7.6 Engel büyüklüğünün değişimi deneylerine ait kurulum.	100
7.7 Sabit müşteri ve engel sayıları ile engel büyüklüğünün değişimi.	102



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
c_{ij}	i - j düğüm çifti arasındaki uzaklık/maliyet
C	Toplam maliyet/mesafe
d	Herhangi bir hedef noktası
E	Düğüm çifti kümesi
G	Yönsüz ve bağlantılı herhangi bir çizge
$i; j$	Düğümmler için gösterge değerleri
k	İlgili rota/araç için gösterge değeri
m	Araç/rota sayısı
n	Müşteri sayısı
q	Araç kapasitesi
$Q; Q_k$	Tüm taleplerin toplamı; rota k üzerindeki toplam yükleme miktarı
$R; R_k$	Çözüme ilişkin rota kümesi; rota k için güzergâh bilgisi
s	Herhangi bir başlangıç noktası
V	Düğüm kümesi
V_c	Müşteri kümesi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar

ARP	Ayrıt Rotalama Problemi (<i>Arc Routing Problem</i>)
CARP	Kapasiteli Ayrıt Rotalama Problemi (<i>Capacitated Arc Routing Problem</i>)
CPU	Merkezi İşlem Birimi (<i>Central Process Unit</i>)
CVRP	Kapasiteli Araç Rotalama Problemi (<i>Capacitated Vehicle Routing Problem</i>)
GA	Genetik Algoritmalar (<i>Genetic Algorithms</i>)
GB	Gigabyte
GHz	Gigahertz
LRP	Konum Rotalama Problemi (<i>Location Routing Problem</i>)
TSP	Gezgin Satıcı Problemi (<i>Traveling Salesman Problem</i>)
VRP	Araç Rotalama Problemi (<i>Vehicle Routing Problem</i>)



1. GİRİŞ

Müşteri taleplerini bir dizi araç ile karşılamada, araçları verimli bir biçimde yönlendirecek rotalamanın planlanması gerekir. Bu işlemin, en az sayıda kaynak ve minimum maliyet ile gerçekleştirilmesi beklenir. Küresel dünyada son derece önemli bir uygulama olarak karşılaşılan bu problem, literatürde Araç Rotalama Problemi (VRP) olarak tanımlıdır ve yoğun bir biçimde çalışılır. Belirli araç sayısı, taşıma kapasitesi ve yakıt miktarı gibi sınırlı kaynakla, talep noktalarına hizmet sağlamak amaçlanır. Bu kapsamda, araçların belirli yerlerden yük alıp belirli yerlere ulaştırdıkları herhangi bir durum veya hareket güzergâhı tespitini gerektiren uygulamalar ele alınabilir.

VRP çözümünde, küçük bir değişiklik büyük maliyetlere neden olabilirken; birtakım iyileştirmelerle de maliyet tasarrufu sağlanabilir. Örneğin ek bir aracın maliyeti, bu aracın kullanılmasına engel olabilmektedir. Doğru bir biçimde belirlenmemiş hatalı rotalamalar ve yönlendirmeler ise maliyeti artırabilmektedir.

Araç rotalama bir kısıtlama problemi olup, kısıt sağlama problemi (*constraint satisfaction problem*) ve kısıtlama ağları (*constraint networks*) 70’li yıllardan itibaren yapay zekâ (*artificial intelligence*) alanında incelenmektedir (Özfırat, 2008). Bu kapsamda, rotalama ve planlama problemlerini çözmek için kullanılabilecek zeki yaklaşımlar ise önemli kazanımlar sağlamaktadırlar.

VRP, bir kombinasyonel eniyileme (*combinatorial optimization*) ve doğrusal programlama (*linear programming*) problemidir. Dantzig and Ramser (1959) tarafından önerilen VRP, sayısız endüstriyel uygulamayla, pek çok alanda karşılaşılan önemli bir gerçek-dünya problemidir. VRP, dağıtım, lojistik, nakliye, taşıma ve ulaştırma gibi endüstri sektörlerinde çözüm gerektirir. Hesaplamasal olarak zor ve karmaşık olup, pek çok problem için çözümün bir parçasıdır:

- Ambulansların hastanın bulunduğu noktaya ulaşmak ve hastaya ulaştıktan sonra hastaneye geri dönmek için kullanacakları en uygun rota kümesinin (güzergâhlar) belirlenmesi
- Arazi veya yerleşke/kampüs alanlarında dağıtım ve toplama işleri

- Arşiv, depo, kütüphane, market gibi yerlerdeki toplama ve toplu yerleştirme işleri
- Bir mağazanın, ürünlerini şubelerine veya yapılan alışverişleri müşterilerine ulaştırması
- Bir otomobil firmasında üretilen araçların çeşitli bölgelerdeki şubelere tırlar yardımıyla ulaştırılması
- Deprem gibi doğal afetler, kazalar veya benzer durumlar sonrasında, donatı, insan (doktor/yaralı), kan, organ vb. taşıma
- Evrak toplama, gazete/para/posta/süt/yakıt/yiyecek-içecek dağıtımı
- Fabrika-içi veya fabrikalar-arası hammadde taşıma
- İnsansız (hava) araçların(ın) (*unmanned (aerial) vehicles*) ve satış elemanlarının (*salespeople*) yönlendirilmesi
- Koli/madde/paket/parça toplama ve teslimatı
- Mal sevkiyatı, (katı) atık / çöp toplama, sokak temizleme
- Okul otobüslerinin rotalanması
- Personel servis güzergâhlarının belirlenmesi
- Bilgi, enerji, hasta, hizmet, personel, ürün veya yolcu akışının yönetimi: etkili akış ve depolama işlemlerinin, (1) planlanması, (2) verimli bir biçimde gerçekleştirilmesi ve (3) kontrolü

VRP, bilgisayar ağları (*computer networks*), talebe-duyarlı ulaştırma sistemleri (*demand-sensitive transportation systems*) ve tedarik-zinciri yönetimi (*supply-chain management*) gibi çalışma alanlarında ve özellikle aktarımın söz konusu olduğu iş uygulamalarında (*business applications*) ve pek çok ortamda çözüm gerektirir. Tüm taleplerin minimum maliyetle karşılanması amaçlanır. Bu nedenle, belirli başlangıç-hedef noktalar arasında yönlendirilecek araçlara ait en uygun rota kümesi belirlenmeye çalışılır.

VRP, yaygın bir yöneylem araştırması (*operational research*) problemidir ve araç kapasitesi (*vehicle capacity*), hizmet türü (*service type*), öncelik kuralı (*priority rule*), zaman aralığı (*time window*) vb.ne dayalı pek çok çeşit ve genelleme içerir (OR Complete | Collective Operations Research Blog, 2012).

Tez çalışmasında, VRP, engel içeren ortamlarda ve kapasite sınırıyla ele alınmış ve Kapasiteli VRP (CVRP) çözümü için melez (*hybrid*) meta-sezgisel (*meta-heuristic*) bir algoritma geliştirilmiştir. Bu çalışmanın literatüre katkısı, CVRP'nin engel içeren ortamlara uyarlanması ve tanımlanan bu yeni probleme bütünsel arama (*global search*) ve yerel/bölgesel arama (*local search*) stratejilerini içeren Genetik Algoritmalar (GA) tabanlı melez bir çözüm yöntemi geliştirilmesidir. Ayrıca, deneysel çalışmaların yapılabilmesi için konumların ve engellerin eklenebildiği görsel bir benzetim (*simulation*) ortamı da oluşturulmuştur. Bu kapsamdaki üç farklı temel katkı ise şunlardır:

1. Engel içeren ortamlar için tanımlanan bu yeni problemin, görünürlük çizgesi (*visibility graph*) yaklaşımından yararlanılarak klasik CVRP'ye dönüştürülmesi
2. Çözümün, farklı türdeki ve düzendeki engelleri içeren ortamlara uyarlanıp; farklı müşteri, engel sayıları ve engel büyüklükleri için deneysel çalışmaların yapılarak, elde edilen sonuçların sunulması
3. VRPLIB problem örneği (*instance*) için ortama, mevcut depo-müşteri konumlarını içermeyecek şekilde, engeller ekleyip deneyler yapılması, toplam maliyetin ve güzergâhların değişiminin gözlemlenmesi

Gerçek-dünya problemlerinde, arazi, atölye, çalışma alanı, fabrika, iç-mekân, liman, oda veya yerleşke gibi herhangi bir yer içerisinde, ağaç, bina/yapı, göl, havuz, konteynır, makine, masa, mobilya, raf, sandalye, sıra, şantiye gibi engeller mevcuttur. Böyle bir ortam, gezgin/mobil robotlar vb. araçlar veya insanlar için engellerden kaçma (*obstacle avoidance*) gerektirir ve bazı yollardan geçilemeyebilir. Problemin, engel içeren bu tür bir ortama uyarlanabilmesi ve çözülebilmesi için iki-aşamalı bir çözüm önerilmiştir:

1. *Uzaklık hesaplama*: nokta çiftleri arasındaki en kısa uzaklıklar, çalışma ortamındaki engeller dikkate alınarak iki adımda hesaplanır:
 - a. her nokta çifti arasındaki potansiyel hat (*line/segment*) ile kesişen engellerin ve kesişme noktalarının tespit edilerek, nokta çiftleri arasındaki görünürlük durumlarının belirlenmesi
 - b. nokta çiftleri arasındaki yeni uzaklıkların hesaplanması

2. *CVRP çözümü*: klasik CVRP'ye dönüşen problem, GA ve yerel arama tabanlı melez meta-sezgisel bir algoritma ile iki adımda çözülür:
 - a. uzaklık matrislerini kullanarak nokta çiftleri arasındaki güzergâhların belirlenmesi
 - b. çözümün, yeni uzaklık ve yol bilgilerini kullanarak CVRP için uygulanması ve tüm talepleri minimum maliyet ile karşılayacak rota kümesinin belirlenmesi

Gezgin robotlar, gezgin satıcılar (*traveling sellers*) veya sualtı araçları için gezinim (*navigation*), yol/rota planlama ve yönlendirme gibi problemler engellerden kaçma gerektirir. Ortamda bilinen (bütünsel), bilinmeyen (yerel), sabit (statik) veya hareket eden (dinamik) engeller olabilir. Önerilen sistem, gerçek-zamanlı (*real-time*) problemleri çözerek endüstriye uyarlanabilir hâle getirebilir. Böylece, engellerin (örneğin çalışan robotlar) bulunduğu fabrika ortamlarındaki dağıtım ve toplama işlerinde veya otobüs şirketleri için araç yönlendirmelerde önemli kazanımlar elde edilebilir.

Tez çalışmasında engeller, dairesel ve çokgensel olarak ele alınmıştır. Probleme ilişkin temel amaç, dışbükey (*convex*) çokgenlere ilişkin çözüm yönteminin geliştirilmesidir. İçbükey (*concave*) çokgenler ve araçların birbirini engel olarak görebilme durumları ise tez çalışmasının kapsamı dışındadır.

VRP'nin engel içeren ortamlara uyarlanmasıyla, problemin, (1) yeni bir alt araştırma-çalışma alanı oluşturulmuş olacak ve (2) daha önce pratik olarak uygulanamadığı alanlarda uygulanabilmesi ve günlük hayattaki farklı ortamlara genişletilebilmesi mümkün olacaktır.

Tez metninin sonraki bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. 2. Bölüm'de, VRP ve probleme ilişkin ayrıntılar, problemin çeşitli türleri, CVRP ve VRP çözümü için kullanılan yöntemler anlatılmıştır. 3. Bölüm'de, sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler, GA, yerel arama stratejileri ve melez yaklaşımlar ele alınmıştır. 4. Bölüm'de, VRP ile ilgili literatür taraması sunulmuştur. Literatürde, tez çalışması kapsamında tanımlanan yeni problem ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmadığı için engel kavramı, VRP dışındaki ilgili diğer

problemler ve yapılan çalışmalar için incelenmiştir. 5. Bölüm’de, engel içeren ortamlarda CVRP tanımlanmış ve problemin çözümü için bir model oluşturulmuştur. Bu bölümde, tez çalışmasında ele alınan problem ayrıntıları ile açıklanmış ve önerilen çözüm yöntemine ait tüm ayrıntılar ve ilgili algoritmalar verilmiştir. Dairesel ve çokgensel engellere ilişkin ayrıntılar ve çözümler, sırasıyla 6. ve 7. Bölümlerde verilmiştir. Bu iki bölümde, geliştirilen melez meta-sezgisel algoritmanın başarımını test etmek amacıyla, ilgili engel türüne göre gerçekleştirilen deneysel çalışmalar da sunulmuştur. Deneylere ilişkin bulgulara 8. Bölüm’de yer verilmiştir. Ayrıca bu bölümde, önerilen yöntemin başarımı da değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, gözlemlenen durumlar ve tartışma ise 9. Bölüm’de özetlenmiştir. Son olarak 10. Bölüm’de, tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalara ilişkin genel bir değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca, ele alınan bu yeni problem ve benzer problemler ile ilgili olarak, ileride yapılabilecek çalışmalar tartışılmış ve çeşitli öneriler sunulmuştur.

2. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ

Bu bölümde, ilk olarak VRP tanımlanmış ve probleme ait bileşenler verilmiştir. Daha sonra, problemin çeşitli türlerinden bahsedilmiş ve VRP türlerinden biri olarak CVRP anlatılmıştır. Son olarak, VRP çözümü için kullanılan yöntemlere değinilmiştir.

2.1 Problemin Tanımı ve Bileşenleri

VRP’de, bir depo (başlangıç/yükleme noktası) konumundan hareket eden, çeşitli talep noktalarına hizmet veren ve bu depoya geri dönen araçların, rotalarına ait toplam maliyeti en aza indirmek amaçlanır. Dağıtım ve taşıma işleri, şirketler için maliyetin en aza indirilmesi gereken önemli bir konudur ve üretim ile ilgili işler kadar maliyetlidir. Bu nedenle VRP, özellikle şirketler için önemli bir problemdir. Hem müşteri taleplerinin zamanında ve yüksek memnuniyet derecesi ile karşılanması hem de pazarda avantaj elde edebilmek ve sürdürülebilir rekabet için az-maliyetli uygun çözümlerin (*feasible solutions*) araştırılması gerekir. Bu kapsamda, stratejik amaçlar, alınacak rotalama-çizelgeleme (*routing-scheduling*) kararları ve araç filosu yönetimi son derece önemlidir. Örneğin rotalama çözümlerinde yükleme yapılmamış (boş) araçların mevcut olması, çok yüksek maliyetlere neden olabilmektedir.

VRP, bir dizi müşteriye hizmet verecek bir dizi araç için en uygun rota kümesinin belirlenmesini gerektirir (Mazzeo and Loiseau, 2004). Her rota, tüm müşterilerin bir altkümesini içerir ve Gezgin Satıcı Problemi (TSP) olarak ele alınabilir. VRP’de pek çok farklı hedef olabilmektedir. Bu nedenle, tüm maliyeti oluşturan alt maliyetlerin her birinin en aza indirilmesi ve toplam maliyetin azaltılması amaçlanır. Araçlar farklı konumlarda hareketlerini tamamlayabilirler veya dağıtım ve toplama işleri bir arada gerçekleştirilebilir. Ayrıca rotalar, araç yükü, seyahat süresi ve uzunluk açısından dengelenmek istenebilir. Çok-hedefli (*multi-objective*) bu problem, çok sayıda değişken ve kısıt içermektedir:

- **Değişkenler**
 - Müşteri sayısı (ayrıca, birden fazla ise depo sayısı)

- Depo-müşteri konumlarına (düğümler) ait koordinat bilgileri ve/veya depo-müşteri konumları arasındaki maliyetler (mesafe/zaman) ve ölçümü
 - Talepler ve araçlar için yükleme kapasiteleri (aynı olmayabilir)
 - Araç sayısı (bilinmemekte veya sınırlandırılmakta)
 - Hizmet için zaman aralığı bilgisi
 - **Kısıtlar (esnek ve keskin¹ kısıtlar)**
 - Bazı taleplerin bazı talepler ile aynı araçta yer almaması
 - Belirli başlama, tamamlanma ve teslimat zamanları
 - Bir rotada olabilecek en fazla talep noktası sayısı
 - Bir talep noktasının başka bir noktadan önce ziyaret edilmesi
 - Bölgesel kısıtlar (bölge değişken olabilir)
 - Gün içerisinde alınabilecek maksimum talep sayısı
 - Maksimum bekleme ve seyahat süreleri: taleplerin araçta uzun süre beklememeleri gerekebilir.
 - Maksimum rota uzunluğu
 - Sürücünün çalışabilme durumları: maksimum çalışma zamanı, çalışabileceği zaman dilimleri, ayrıca molalar
 - Yol durumları (örneğin engel içeren ortamlar)
 - **Amaç (maliyeti eniyileme)**
 - En uygun rota kümesi (güzergâhlar) ve rota uzunluklarıyla;
- Minimum**
- Gerekli/kullanılacak *araç sayısı*² ve toplam mesafe
 - Sürücülerin iş yükü
 - Tamamlanma/çözüm zamanı, toplam bekleme süresi
 - Trafik tıkanıklığı
 - Yakıt tüketimi / CO₂ salınımı
- Maksimum**
- Araçların doluluk oranları (kullanım miktarları)

¹ Keskin (esnek olmayan) kısıtlar, karşılanması gereken kısıtlardır.

² Belli sayıda araçla, araç sayısı sabit tutularak, toplam mesafe en aza indirilmeye çalışılabilir. Bu durum, araç filosunun sınırlı olduğu uygulamalarda ve özellikle gerçek hayatta söz konusudur.

- Elde edilen toplam kâr (minimum çaba ile)
- Sağlanan müşteri memnuniyeti

Probleme ait üç temel bileşen ise şu şekilde ifade edilebilir:

- **Düğümler**

- **Depo (araç çıkış noktaları)**

- Tek veya birden fazla
- Merkezî veya merkezî olmayan (iç, dış) bir biçimde
- Araçların bulunduğu yerde konumlandırılmış
- Sınırlı/sınırsız ürün stokuna sahip

- **Müşteriler (araç hedef noktaları)**

- Homojen veya heterojen olarak dağılmış
- Kümelenmiş veya kümelenmemiş
- Farklı geometrik şekilleri (karesel, konik) oluşturacak şekilde yerleştirilmiş

- **Talepler**

- Çevrim içi-dışı (*online-offline*: dinamik veya statik olabilir)
- Ayrık veya belirsiz, homojen veya heterojen (talep türü)
- Sıralı veya rasgele (geliş özelliği)
- Karesel, konik veya kümesel bir biçimde dağılımlı

- **Araçlar**

- Özdeş olmayabilirler: farklı kapasitelere ve/veya hızlara sahip heterojen araçlar
- Taşıma kapasitesi: yüklenebilecek maksimum ağırlık/hacim

VRP¹ türü problemlerde, araçlardaki dolu olmayan kısımlar, bekleme süreleri ve yakıt tüketimi gibi durumlar da ele alınabilir. Örneğin Jozefowicz et al. (2009), iki-hedefli bir VRP'yi ele almışlardır: (1) rotaların dengesi ile rotaların toplam uzunluğunu en aza indirmek (*minimizing*) ve (2) maksimum rota uzunluğu

¹ VRP ile ilgili ayrıntılar, problemin modellenmesi, bazı varyasyonları ve uygulamaları, problemin çözümüne ilişkin yaklaşımlar ve ilgili gelişmeler için Bkz. Toth and Vigo (2002) ve Golden et al. (2008). Problemin gelişim sürecine (araştırma alanı ile ilgili kesin (*exact*) ve sezgisel yöntemler ve gelişmeler) ilişkin bir inceleme için Bkz. Laporte (2009).

ile minimum rota uzunluğu arasındaki farkı en aza indirmek. Çözüm için evrimsel algoritma tabanlı meta-sezgisel bir yöntem önermişlerdir.

2.2 Problemin Türleri

VRP'nin bazı varyasyonları ve özel türleri şunlardır:

- **Kapasiteli (*capacitated*) VRP:** Araçlar özdeşler ve sınırlı taşıma kapasitesine sahiptirler (Bölüm 2.3).
- **Heterojen filolu (*heterogeneous (fixed) fleet*) VRP:** Araçlar özdeş değildirler ve farklı kapasitelere sahiptirler. Mevcut araç sayısı (filo büyüklüğü) ise sınırlıdır. Heterojen VRP, tedarik-zinciri lojistiğinde (*supply-chain logistics*) önemli bir rol oynar (Liu, 2013)¹. Bu nedenle, gerçek hayatta karşılaşılan önemli bir VRP türüdür.
- **Kümülatif (*cumulative*) CVRP:** CVRP'de olduğu gibi toplam rotalama maliyetini eniyileme yerine, müşterilere varış zamanları toplamının (doğal afet sonrası insanlara yardım) en aza indirilmesi amaçlanır (Ribeiro and Laporte, 2012; Ke and Feng, 2013). Bu nedenle, gerçek-dünya uygulamalarını modellemek için kullanılabilir.
- **Zaman pencere/araıklı (*with time windows*) VRP:** Teslimatların içinde yapılması gerektiği belirli zaman aralıkları mevcuttur ve her müşterinin talebi gerekli zamanda karşılanır. Araçlar belirli zamanlardan önce ve/veya sonra hizmet vermemelidirler. Bir aracın müşteriye erken ulaşması, ek bekleme maliyetine veya araca neden olur. Zaman aralıkları (yarı) esnek (*with (semi) soft*) olabildiği gibi, esnek olmayacak şekilde (*with rigid*) de ele alınabilmektedir. Problemin zamana-bağlı (*time-dependent*) eşdeğerinde ise iki nokta arasındaki seyahat zamanı kalkış zamanına bağlıdır.

¹ Liu (2013), çözüm nüfusunun çaprazlama ve yerel aramalar ile yinelemeli bir biçimde evrimleştiği, sabit ve değişken maliyetli türevleri çözebilecek melez bir nüfus sezgiseli önermiştir.

- **Çok turlu (*with multiple trips*) VRP:** Araçlar bir rotadan fazla yapabilmektedirler. Bu nedenle, gerekli araç sayısı çözümdeki rota sayısından daha az olabilmektedir.
- **Dağıtım-toplamalı (*with pickup and delivery*) VRP:** Bir dizi malın belirli toplama noktalarından diğer dağıtım noktalarına ulaştırılması (alma ve bırakma söz konusu) gerekir. Rotalar, depo dışındaki noktalarda başlayıp sonlanabilir. Problemin eş-zamanlı (*simultaneous*) eşdeğerinde (Min, 1989) ise her müşteri dağıtım ve toplama taleplerinde bulunur ve müşterilere eş-zamanlı olarak hizmet verilir (süt şişeleri dağıtılırken boş şişelerin toplanması). Problemin karışık eşdeğerinde ise dağıtım ve toplama işleri karışık bir biçimde yapılır.
- **Önce dağıt sonra topla (*with backhauls*) VRP:** Müşteriler iki altkümeye ayrılırlar. Araçlar önce ürün dağıtım yapılacak müşterileri, daha sonra ürün toplanacak müşterileri ziyaret edecek şekilde dağıtım planı yapılır. Örneğin ambalajlar/ürünler iade edilmek veya geri toplanmak istenebilir ve bu durum da kapasitenin bir parçasıdır.
- **Çok-depolu (*multi-depot*) VRP:** Birden fazla depo mevcuttur. Başlangıç-hedef noktalar farklı depolar olabilmektedir. Her araç, ilgili depodan hareket eder ve bu depoya geri döner. Bu nedenle, hangi depodan hangi müşterilere hizmet verileceğinin de belirlenmesi gerekir. Müşteriler depoların çevresinde kümelenmişse, her depo ve ilgili müşteri grubu ayrı birer VRP olarak çözülebilir. Problemin depolar-arası rotalı (*with inter-depot routes*) eşdeğerinde ise araçlara, rotaları üzerindeki ara depolarda dolum yapılabilir. Taleplerin en kısa süre ve yol ile karşılanması ve kullanılacak araç sayısının en uygun sayıda seçilmesi oldukça önemlidir (Çalışkan, 2011).
- **Ayrık teslimatlı (*with split delivery*) VRP:** Her müşteri, birden fazla araç tarafından ziyaret edilebilir / hizmet alabilir (Ceschia et al., 2013). Aracı dolduran (araç kapasitesini aşan) yüklemeler için ek araçlara gerek duyulur. Bu nedenle, herhangi bir teslimat (bölünmüş/parçalı talep) tek seferde yapılmayabilir.
- **Rasgele talepli (*with stochastic demands*) VRP:** Müşterilere ait talep miktarları, bilinmemektedir ve rasgele değerler olarak ifade edilir. Her

müşterinin talebi için bir olasılık dağılımı belirlenir. Rasgelelik, talepler dışında, hizmet zamanı ve/veya düğüm çiftleri arasındaki hareket için gerekli seyahat zamanı için de olabilir.

- **Son giren ilk çıkar mantıklı (*last in first out*) VRP:** Herhangi bir teslimat noktasında teslim edilmekte olan talep, en son alınan taleptir.
- **Bölge-kısıtlı (*region-constrained*) VRP:** Rotalar, belli bölgesel kısıtlar dikkate alınarak oluşturulur.
- **Mesafe-kısıtlı (*distance-constrained*) VRP:** Rota uzunlukları, belirlenen maksimum uzunluk değerini aşmamalıdır.
- **Asimetrik (*asymmetric*) VRP:** Nokta çiftleri arasındaki kenarlar (ayrıt/ark) yönlüdür ve gidiş-dönüş maliyetleri farklı olabilmektedir. Örneğin herhangi bir yol tek yönlü (gidişe/dönüşe kapalı) olabilir.
- **Periyodik (*periodic*) VRP:** Müşteriler belirli zaman periyotlarında ziyaret edilirler. Bu problem, özellikle gerçek-dünya uygulamalarında oldukça önemlidir.
- **Açık (*open*) VRP:** Araçlar depoya dönmek zorunda değildirler.
- **Dinamik (*dynamic*) VRP:** Problemin çözümünde, değişken ve beklenmeyen/planlanmamış durumlar (örneğin araç arızaları, hava koşulları, trafik tıkanıklığı veya acil/yinelenen bazı durumlar) ele alınır. Yeni talepler gelmiş, mevcut talepler geri çekilmiş olabilir. Problem çözülürken, bu durumlar dikkate alınır ve rotalar zamana-bağlı bir biçimde değişir. Elde edilecek ve işlenecek bilgi için gerçek-zamanlılık söz konusudur ve bu nedenle problem, çevrimiçi VRP olarak da ifade edilebilmektedir.
- **Tutarlı (*consistent*) VRP:** Aynı sürücü aynı müşterileri ziyaret eder. Bu problemde, müşteriye odaklanılır ve müşterilerin hizmet beklediği her gün için ziyaretler olabildiğince aynı zamanlarda gerçekleştirilir.
- **Olasılıksal (*probabilistic*) VRP:** Talepler kesin değil, olasılıksaldır.
- **Filo büyüklüğü ve karma (*fleet size and mix*) VRP:** Bu problemde, heterojen filolu VRP'den farklı olarak, mevcut araç sayısının sınırsız olduğu varsayılır. Öte yandan, bu problemler benzerdir.
- **Uydu olanakları ile (*with satellite facilities*) VRP:** Taleplerin rasgele olduğu durumlarda, rotaların eniyilemesi belirgin ölçüde ek maliyete

neden olabilmektedir. Beklenmeyen taleplere karşı, rota boyunca araçları doldurmak amacıyla, kapasite ve rota zamanı kısıtlarına bağlı uydu olanaklarından yararlanılabilir. Böylece, teslimatlara devam edebilmek için depoya dönmek zorunda kalınmayabilir.

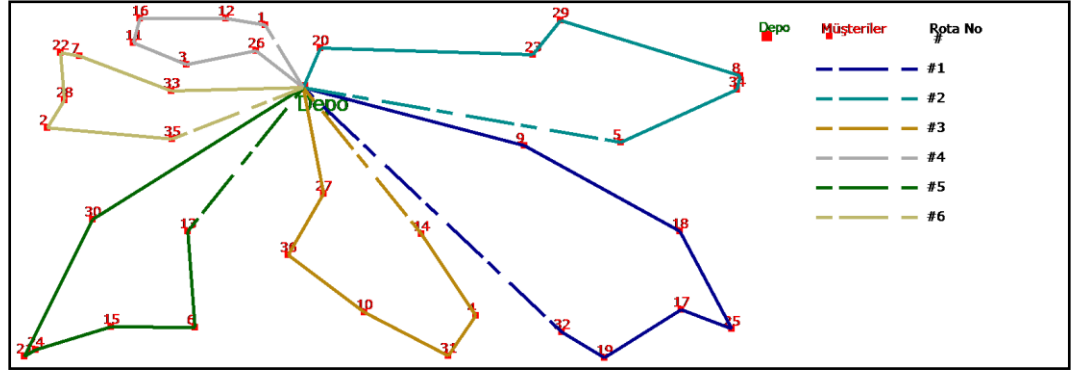
- **Yer/bölge-bağımlı (site-dependent) VRP:** Heterojen bir araç filosu kullanılır. Müşteri grubu ile müşterilere hizmet verecek araç türleri arasında uyumluluk söz konusudur. Talebi çok fazla olan müşteriler büyük araçlar, dar alanlarda yer alan müşteriler ise küçük/orta büyüklükte araçlar gerektirebilir. Her müşteri, uygun araç türlerinden sadece birini tercih eder. Aynı araç türünü seçen müşteriler ayrı birer grup olacak şekilde, her araç türü için söz konusu aracı seçen müşteri grubu üzerinden bir dizi klasik VRP çözümü gerçekleştirilir.

VRP, problemin mevcut türlerinin çeşitli birleşimleriyle ele alınabilir. Örneğin heterojen filolu eş-zamanlı dağıtım-toplamalı VRP, heterojen VRP ve dağıtım-toplamalı VRP'nin bütünleştirilmesi ile çalışılan başka bir VRP türüdür. Zaman aralıkları ve ayırık teslimatlar ile heterojen filolu VRP ise VRP'nin üç farklı türünü bir araya getirir. Başka bir örnek ise esnek zaman pencereci araç rotalama ve çizelgeleme problemidir.

2.3 Kapasiteli Araç Rotalama Problemi

VRP'nin en genel şekli, tüm müşterilerin taleplerinin bilindiği¹ ve karşılandığı, tüm araçların özdeş ve sınırlı kapasitede olduğu CVRP'dir (Boonsam et al., 2011). CVRP, Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, m tane q kapasiteli v hızına sahip aracın kullanacağı en uygun R rota kümesinin belirlenmesi olarak tanımlanır. Merkezî bir depodan hareket eden araç filosunun, bir coğrafi alanda farklı noktalara dağılmış n müşteriye ait tüm talepleri en az C maliyetle (Denklem 2.1'de verilmiştir) karşılaması amaçlanır. CVRP, yoğun bir biçimde çalışılan, pek çok karakteristik özellik içeren ve çok sayıda türü olan bir problemidir.

¹ Problemin statik olduğu durumda, talep miktarları önceden bilindiğinden, çözüm için ayrı bir planlama gerekmemektedir. Problemin dinamik olduğu durumda ise talepler eş-zamanlı bir biçimde toplanır ve dağıtılır.



Şekil 2.1: Basit bir CVRP çözümü örneği (36 müşteri için).

Şekil 2.1'deki kesikli çizgiler, her rotadaki son geçişi, yani rotadaki son müşteri ile depo arasındaki doğru parçasını ifade eder. Bu temel VRP modeline ilişkin çözümde ise her biri altışar müşteri içeren altı rota yer almaktadır.

CVRP için depo-müşteri konumlarının, talep miktarlarının ve araç kapasitesinin önceden, araçlar yola çıkmadan önce, bilinmekte olduğu kabul edilir. Nokta çiftleri arasındaki bağlantıları ifade eden kenarlar üzerindeki ağırlık değerleri ise bu noktalar arasındaki uzaklık/maliyet bilgisidir. Probleme ilişkin dört temel varsayım şunlardır:

1. Depo konumuna ait talep yoktur ve depo tüm talepleri karşılayabilecek ürün stokuna sahiptir.
2. Her müşterinin bir talebi vardır.
3. Taşıma işlerini gerçekleştirecek yeterli sayıda araç mevcuttur.
4. Talep miktarları ve araç kapasitesi birim temellidir (pozitif tamsayı değerler). Taleplerin miktarları dışında, taleplere ilişkin herhangi bir bilgi (taleplerin türü ve şekli gibi ayrıntılar) dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle, araçlara ait kapasiteler tam olarak kullanılabilir.

Probleme ait üç temel kısıt ise şunlardır:

1. Her rota depoda başlar ve sonlanır. Çözüm depodan ayrı tur içermez ve her araç, depodan hareket edip tüm müşterilerin bir kısmına (yeterli kapasitedeyse tümüne) hizmet verir ve depoya geri döner (tek rota).
2. Her müşteri, tam olarak bir araçla ve sadece bir kez ziyaret edilir.

3. Herhangi bir rota üzerindeki müşterilere ait talep miktarlarının toplamı, araç kapasitesinden daha fazla olamaz.

2.3.1 Probleme ve problemin çözümüne ilişkin model

Gösterge değerleri olarak i, j ve k kullanılmak üzere (i ve j düğümleri, k ise ilgili rotayı/aracı gösterir), CVRP için ele alınan değişkenler şunlardır:

- n : müşteri sayısı
- m : araç/rota sayısı
- q : araç kapasitesi
- d_i : müşteri i için talep miktarı
- u_i : ilgili rotada, i düğümüne kadar dağıtılan toplam yük miktarı
- c_{ij} : i - j düğüm çifti arasındaki (kenar üzerindeki) uzaklık/maliyet
- V : düğüm kümesi (depo-müşteri konumları)
- V_c : müşteri kümesi
- E : düğüm çifti kümesi (kenarlar)
- Q : tüm taleplerin toplamı
- Q_k : rota k üzerindeki toplam yükleme (gerekli kapasite) miktarı
- R : çözüme ilişkin rota kümesi
- R_k : rota k için güzergâh bilgisi (ziyaret sırası)
- C : toplam maliyet/mesafe (tüm rotaların uzunlukları toplamı)

$G = (V, E)$, yönsüz (*undirected*, kenarlar simetrik) ve bağlantılı (*connected*, her düğüm çifti arasında yol mevcut) bir çizge olmak üzere;

- $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$: düğüm kümesi
- v_0 : depo konumu
- $V_c = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$: müşteri konumları
- $E = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V ; i \neq j\}$: düğüm çifti kümesi
- $c_{ij} = c_{ji}$: kenarlar simetrik

Problemin çözümünde;

- $R_k = \{v_0, v_i, v_j, \dots, v_0\} \quad v_i, v_j \in V_c ; i \neq j$ (rota tek müşteri de içerebilir)
- $Q_k = \sum_{i=1}^n d_i (v_i \in R_k)$
- Uygun bir rota olabilme koşulu : $Q_k \leq q$
- $Q = \sum_{k=1}^m Q_k$

CVRP çözümüne ilişkin model ise şu şekildedir:

$$\text{Min } C = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m c_{ij} * X_{ijk} \quad (\forall v_i, v_j \in V ; i \neq j) \quad (2.1)$$

$$\sum_{i \in V} X_{ij} = 1 \quad (\forall v_j \in V_c ; i \neq j) \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in V} X_{ij} = 1 \quad (\forall v_i \in V_c ; i \neq j) \quad (2.3)$$

$$\sum_j X_{0j} = \sum_i X_{i0} \quad (\forall v_i, v_j \in V_c ; i \neq j) \quad (2.4)$$

$$u_i - u_j + q * X_{ij} \leq q - d_j \quad (\forall v_i, v_j \in V_c ; i \neq j) \quad (2.5)$$

$$d_i \leq u_i \leq q \quad (\forall v_i \in V_c) \quad (2.6)$$

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & i \text{ düğümünden } j \text{ düğümüne } k \text{ aracı ile gidiş var ise} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad d_i + d_j \leq q \quad (\forall v_i, v_j \in V_c) \quad (2.7)$$

Denklem 2.1’de *amaç işlevi* verilmiştir. Oluşturulan modelde, Denklem 2.2’deki Kısıt (1) ve Denklem 2.3’teki Kısıt (2), sırasıyla, her müşteri konumuna bir adet giriş ve her müşteri konumundan bir adet çıkış olmasını sağlamaktadır. Denklem 2.4’teki Kısıt (3), depodan çıkan ve depoya giren araç sayısının birbirine eşit olması gerektiğini göstermektedir. Denklem 2.5’teki Kısıt (4) alt tur eleme kısıtı olup, Denklem 2.6’daki Kısıt (5) ise her turda i düğümüne kadar dağıtılan ürün miktarının i düğümünün talebi ile araç kapasitesi arasında olması gerektiğini göstermektedir. Denklem 2.7’de ise *karar değişkeni* verilmiştir.

2.3.2 Probleme ilişkin bir örnek

Örneğin “{0, 1, 2, 3, 4, 0, 5, 6, 0, 7, 0}” rota kümesi için her rotaya ait güzergâh bilgisi ve rota-içi talep toplamı Çizelge 2.1’de verilmiştir ($q = 40$).

Çizelge 2.1: Örnek bir CVRP’ye ilişkin bilgiler.

Rota/Araç #	1	2	3
Güzergâh	{0, 1, 2, 3, 4, 0}	{0, 5, 6, 0}	{0, 7, 0}
Rota-içi müşteri sayısı	4	2	1

Konum #	0	1	2	3	4	0	5	6	0	7
Talep miktarı	0	15	10	5	5	0	15	10	0	5
Araçtaki toplam yükleme	0	15	25	30	35	35	15	25	25	5
Toplam uzaklık/maliyet	$C_{01} + C_{12} + C_{23} + C_{34} + C_{40}$					$C_{05} + C_{56} + C_{60}$			$C_{07} + C_{70}$	

Tüm talepleri minimum maliyetle karşılamada, gerekli araç sayısı en az ve toplam mesafe en kısa olacak şekilde, rota sayısı, rotalama maliyeti ve rota-güzergâhları belirlenir. Literatürdeki VRP ile ilgili çoğu çalışmada (Chand et al., 2010; Chand and Mohanty, 2013a; 2013b), bu iki hedef üzerinde yoğunlaşmıştır. Araçlara ait en uygun rota kümesini belirlemek için çok sayıda müşteri az sayıda araçla ziyaret edilecek şekilde, her araç maksimum seviyede yüklenir.

2.4 Problemin Çözümü için Kullanılan Yöntemler

Problem büyüklüğünün (müşteri sayısı) artmasıyla, karmaşıklık (*complexity*) büyük ölçüde ve çözüm zamanı üstel olarak (*exponentially*) artar. Bu nedenle VRP, NP-zor problemler sınıfında yer alır. Arama uzayında bütünsel-en-iyi (*global optimum*) çözümü bulmak, hesaplamasal olarak karmaşıktır. Çözüm için kaba-kuvvet arama (*brute-force search*) ile tüm ziyaret alternatiflerini ele almak ve minimum-maliyetli olanını aramak oldukça zor ve maliyetlidir.

VRP çözümü için literatürde pek çok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerin bir kısmı ise TSP için geliştirilmiş (rota-içi iyileştirme için sezgisel yöntemler) ve VRP'ye uyarlanmıştır. Bu yöntemler, kesin, sezgisel ve meta-sezgisel olarak üçe ayrılırlar. Minimum k-ağaç (*minimum k-trees*) yöntemi, çok yüzlü (*polyhedral*) yaklaşım, dallan ve sınırla (*branch-and-bound*), dallan ve kes (*branch-and-cut*), dallan ve ücretlendir (*branch-and-price*) ve dinamik programlama (*dynamic programming*) kesin yöntemlerdir. Süpürme (*sweep*) ve tasarruf (*savings*) yöntemleri, en yakın komşuluk (*nearest neighbor*) ve en yakın yerleştirme (*nearest insertion*) algoritmaları ve önce kümele sonra rotala (*cluster first, route second*) ise klasik sezgisel/buluşsal yöntemlere örnek olarak verilebilir. Ayrıca pek çok meta-sezgisel yöntem ve yapay zekâ yöntemi de kullanılmaktadır:

- Benzetimli tavlama / tavlama benzetimi / ısıtma işlemi (*simulated annealing*)
- Çizge teorisi (*graph theory*)
- Değişken komşuluk arama (*variable neighborhood search*)
- GA (*genetic algorithms*)
- Sürü zekâsı tabanlı yaklaşımlar (*swarm intelligence algorithms*)
 - Karınca kolonisi eniyilemesi algoritması (*ant colony optimization algorithm*)
 - Kuş sürüsü algoritması (*bird swarm algorithm*)
 - Parçacık sürüsü eniyilemesi (*particle swarm optimization*)
 - Yapay arı kolonisi algoritması (*artificial bee colony algorithm*)
- Tabu/yasaklı arama (*tabu search*)
- Veri madenciliği teknikleri (*data mining techniques*)
- Yapay sinir ağları (*artificial neural networks*)
- Yol tarama (*path scanning*)

Bu yaklaşımların bir kısmı yapay zekâ alanı dâhilindeki yapılara dayanmakta ve bazı durumlarda birleştirilip bütünleştirilmektedirler. Örneğin Özfirat'a (2008) göre, yapay zekâ tekniklerinin popülerleşmesiyle, çok sayıda araştırmacı bu teknikleri zaman pencereli VRP'ye uygulamıştır. Bu kapsamda güçlü bir teknik olarak tabu arama, yapay zekâyı kullanan problem tekniklerine sahiptir ve zeki bir şekilde problem çözme prensiplerini ortaya çıkarmaya çalışır (Kemer, 2010). Şeker (2007) tabu aramayı, yerel-en-iyi (*local optimum*) olmanın ötesindeki çözüm uzayını keşfetmek için yerel bir sezgisel arama yaklaşımına kılavuzluk eden meta-sezgisel bir yöntem olarak ifade etmiştir. Zeki çözümler geliştirmek için farklı yapay zekâ yöntemleri de kullanılabilir. Çözüm için sıklıkla kullanılan bu yöntemlerden bir diğeri ise GA'dır.

Kesin çözüm yöntemlerinden biri olan tasarruf yöntemi, Clarke and Wright (1964) tarafından geliştirilmiş ve her adımda, mevcut rota kümesinden daha iyi bir küme elde edebilmenin amaçlandığı bir yaklaşımdır. Başlangıçta her talep noktasına bir araç atanır. Olası en büyük tasarruf dikkate alınarak rotalar birleştirilir (müşteri grupları bir araya getirilir) ve mevcut araç sayısı azalır. Bu

yöntemde, uygunluk durumları kontrol edilerek maliyet azalmaları ele alınır. Maliyet tasarrufu ise müşterilerin aynı rotada hizmet almalarından kaynaklanır.

Demircioğlu (2009), zaman pencereli VRP için tasarruf yöntemini geliştirerek, Mersin'deki bir dağıtım firmasında uygulama yapmıştır. Bu yöntem, her *müşteri çifti*¹ arasındaki maliyet tasarrufunu hesaplayarak başlar. “i.” ve “j.” müşteriler ayrı turlarda iken, *i.* müşteriden sonra *j.* müşteri eklenerek turlar birleştirilir. Müşterilerin aynı turda hizmet almalarından kaynaklanan en büyük tasarrufu sağlayan müşteri çifti, müşteri talebi ve araç kapasitesi kısıtları dikkate alınarak seçilir. Bu işlem, tüm müşteriler araçlara atanana kadar yinelenir.

Masum et al. (2011), problemin doğasına bağlı olarak, VRP'nin büyük örnekleri için kesin yöntemler kullanmanın mümkün olmadığını ifade etmişlerdir. Ünsal'a (2010) göre, VRP çözümünde, kesin sonuç veren algoritmalar yerine sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tür problemlerde, meta-sezgisel yöntemler başarılı sonuçlar üretirler (Lin et al., 2009; Ke and Feng, 2013).

Kesin yöntemlerin, en-iyi-çözümü garanti etmelerine ve problemin küçük örnekleri için uygun olmalarına rağmen, doğrusal programlama tekniklerini ele almaları, yavaş ve maliyetli olmaları, pratik ve karmaşık durumları ele almada esnek olmamaları; klasik sezgisel yöntemlerin ise yeterince gürbüz olmamaları ve yerel-en-iyi noktalarda takılı kalabilmeleri, VRP türü problemlerin çözümü için *meta-sezgisel yöntemlerin*² kullanımını gerektirmektedir.

¹ Tez çalışmasında müşteri çifti ile ifade edilmek istenen, iki müşteri konumu veya depo konumu ve bir müşteri konumudur.

² VRP çözümüne ilişkin meta-sezgisel yöntemlere ait kaynakça için Bkz. Gendreau et al. (2008).

3. META-SEZGİSEL YÖNTEMLER VE GENETİK ALGORİTMALAR

Bu bölümde, ilk olarak yaklaşımsal (sezgisel ve meta-sezgisel) yöntemler açıklanmıştır. Daha sonra, bu kapsamdaki yöntemlerden biri olan GA, bileşenleri ve uygulama alanları anlatılmıştır. Son olarak, yerel arama konusuna, bu kapsamdaki stratejilere ve melez yaklaşımlara değinilmiştir.

3.1 Sezgisel Yöntemler

Bilgisayar bilimlerinde sezgi, bir problemi eniyileme amacıyla, aday çözümü yinelemeli bir biçimde iyileştiren hesaplamasal bir yöntemdir. Çeşitli hareketler arasında etkili olanına karar vermek için tanımlanır. Sezgisel yöntemler, bir problemin çözümü için sezgisel yaklaşımların uygulandığı (keşfetme ve öğrenme söz konusu) ve çözüme ulaşana kadar sezgisel bir biçimde seçim yapmayı gerektiren yöntemlerdir. Problemlere zeki yollarla ve süreci hızlandıracak şekilde çözüm aramak amacıyla kullanılırlar. En-iyi-çözümü bulmanın mümkün olmadığı ve en-iyiye-yakın (*near-optimal*) çözümlerin yeterli olduğu durumlarda, büyük-boyutlu problemler için tercih edilmektedirler. Bu noktada ise basitlik, doğruluk, esneklik ve hız açısından değerlendirilmelidirler.

Eniyileme problemlerinde, kesin çözümü bulmak yerine, düşük hesaplama zamanı ile yüksek çözüm kalitesi elde edilmeye çalışılır. Bu nedenle, esnek (değişiklik durumlarına uyarlanabilen) ve anlaşılabilir (basit bir biçimde gerçekleştirilebilen) algoritmalar geliştirilmelidir.

Doğruluğunun¹ gösterilmesi gerekmeksizin, sezgisel bir yöntemin kullanılmasıyla, zor ve karmaşık bir probleme makul sürede uygun çözümler bulunabilmesi amaçlanır. Çözüm zamanını en aza indirerek, çözüme hızlı bir biçimde yakınsanmaya çalışılır ve giderek daha iyi çözümlerin elde edilmesi sağlanır. Çözüm, her zaman aynı sürelerde ve aynı sonuçlarla elde

¹ Yöntemin doğruluğu, yakınsama (*convergence*) özelliğine sahip; fakat en-iyiye yakınsaması ispat edilemeyen algoritmalar için söz konusudur.

edilememektedir. Bu nedenle, çözüm için uygulanan algoritmalar mümkün olduğunca iyileştirilmeli ve makul sürelerde işletilmelidir. Bu yöntemler, olasılıksal ve geri-beslemeli bir biçimde çalışırlar. Arama sırasında elde edilen bilgi saklanır (deneyim tabanlı teknikler) ve kullanılır. Çözüm kümesindeki tüm aday çözümleri taramak yerine, çözüm kümesi etkili bir biçimde aranır. Bu nedenle, yaklaşık çözüm veren algoritmalar olarak da ifade edilebilirler.

3.2 Meta-Sezgisel Yöntemler

Meta-sezgisel yöntemler, probleme-özü alt-seviye sezgisel yöntemlere (örneğin basit bir yerel arama) ve arama sürecine kılavuzluk eden ve yöntemlerin yinelenmeli bir biçimde uygulandığı ileri/üst-seviye ve daha modern bir süreçtir. Bu yöntemler, büyük-boyutlu problemlere ait çok büyük arama uzaylarını, en-uygun-çözümü bulmak için verimli bir biçimde aramak amacıyla kullanılırlar. Bu kapsamda, karmaşık bir öğrenme süreci kullanılabilir. Literatürde sıklıkla karşılaşılan bazı meta-sezgisel yöntemler ise şunlardır:

- Benzetimli tavlama
- GA
- Karınca kolonisi eniyilemesi algoritması
- Kuş sürüsü algoritması
- Parçacık sürüsü eniyilemesi
- Tabu arama
- Yapay arı kolonisi algoritması
- Yapay sinir ağları

Şevkli (2010), probleminden bağımsız olarak arama alanını etkili ve verimli bir biçimde dolaşıp çözüm sunan sezgisel yöntemleri, meta-sezgisel yöntemler olarak ifade etmiştir. Ona göre meta-sezgisel yöntemler, basit sezgisel yöntemlerin birleştirilmesi ile daha üst seviyeden bir çalışma yöntemi sunarlar. Özfiat'a (2008) göre ise klasik sezgisel yöntemler hızlı çözümler sağlarlar, fakat çözüm kalitesi meta-sezgisel yöntemlerle aşılr.

Klasik eniyileme yöntemleri ile çözülemeyen problemleri ele almak için geliştirilen meta-sezgisel yöntemler, bu yöntemlere göre daha iyi başarımlar ve sonuçlar sağlarlar. Çözümle ilişkin algoritmaların (belli ölçüde veya tam olarak) rasgelelikleri nedeniyle, en-uygun-çözümlerin elde edilmesi garantili değildir. Genel-amaçlı bu algoritmalar, problemde bağımsız olup, geniş alanda etkili aramalar gerçekleştirilebilmesini sağlarlar. Birtakım değişikliklerle çeşitli problemlere uyarlanabilirler ve bu nedenle yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Rotalama (TSP ve VRP türü problemler), yol planlama (*path planning*), çizelgeleme (ders programı hazırlama, makine çizelgeleme, personel çalışmalarının zamanlaması), örüntü tanıma ve sınıflandırma gibi kombinasyonel problemler, zorluğa ve problem büyüklüğüne bağlı olarak, çözüm için sezgisel yöntemlerin kullanılmasını gerektirirler. Bu problemlerin çözümleri için önerilen pek çok yöntem ve çeşitli yapay zekâ teknikleri mevcuttur.

Yapay zekâ, eniyileme problemlerine etkili çözümler sunan önemli bir çalışma alanıdır. Bu kapsamdaki meta-sezgisel yöntemlerle yerel-en-iyi olma sınırları aşılabilir¹ ve böylece bütünsel yaklaşımlar geliştirilebilir. Yapay zekâ teknikleri olarak da bilinen ileri-sezgisel yöntemler, sezgisel yöntemlerden farklı olarak, genellikle doğada karşılaşılan çeşitli davranışların bilgisayar ortamında benzetimini yaparak çözüm üretmeye çalışmakta; sezgisel yöntemi bir adım daha ileriye taşıyıp probleme-özgü olmaktan çıkarmaktadırlar (Özsoydan, 2011).

Literatüre bakıldığında, gerekirci (*deterministic*) yaklaşımların bu vb. problemlerde yetersiz ve başarısız oldukları; yerel arama stratejileri ile desteklenmiş meta-sezgisel yöntemlerle çözüme etkili bir biçimde yakınsanabildiği görülebilir. Literatürde meta-sezgisel kavramı, *modern sezgisel* veya *yapay zekâ yaklaşımı* olarak da geçmektedir (Erol, 2006; Ünsal'dan, 2010).

Meta-sezgisel yöntemler farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Örneğin GA ve karınca kolonisi eniyilemesi algoritması, doğadan esinlenilen, tek çözüme dayalı

¹ Meta-sezgisel yöntemlerle, yerel-en-iyi noktaları atlayıp bütünsel olana ulaşmak amaçlanır.

olmayan, statik amaç işlevi ve hafıza kullanan yaklaşımlardır. Tabu arama, doğadan esinlenilmeyen, tek çözüme dayalı ve hafıza kullanan bir yaklaşımdır. Benzetimli tavlama hafıza kullanmamakta, değişken komşuluk arama ise tek komşuluk yapısı kullanmamaktadır. Bazı yaklaşımlar ise dinamik amaç işlevleri kullanırlar. Yapay sinir ağlarında ve karınca kolonisi eniyilemesi algoritmasında öğrenme söz konusu iken, benzetimli tavlama ve tabu arama yerel arama olanağı sunarlar. Bu kapsamdaki en önemli nokta, aramadan elde edilen (geçmiş) bilginin kullanılmasıdır. Meta-sezgisel yöntemlerde, arama uzayında aramayı etkili bir biçimde gerçekleştirebilmek için çeşitlilik (*diversification*), arama sırasında elde edilen deneyimin işletimi için yoğunlaşma (*intensification*) söz konusudur.

Mühendislik, robotbilim (*robotics*) ve tasarım gibi alanlardaki, işlev eniyileme (*function optimization*), planlama, rotalama ve yol bulma gibi pek çok problemin çözümü için benzetim, eniyileme ve modelleme amaçlı yöntemler geliştirilmiştir. Problemden bağımsız bir yaklaşım olarak, evrimsel süreci temel alarak uygulanan bu yöntemlerden biri GA'dır.

3.3 Genetik Algoritmalar

Klasik eniyileme yöntemleri, tek-hedefli (*single-objective*) problemleri çözüme başarılı olabilirler. Çok-hedefli ve zor problemlerin çözümünde ise daha gürbüz yöntemlerin kullanılması uygundur. Bu kapsamdaki yaklaşımlardan biri, geniş uygulama alanıyla, yapay zekâ alanına ait çözüm yöntemlerinden biri olan GA'dır. Holland (1975) tarafından önerilen GA, nüfus/topluluk (*population*) tabanlı ve paralel arama yapan bir eniyileme yöntemidir (GA temelleri ve diğer ayrıntılar için Bkz. De Jong (1975) ve Goldberg (1989)).

GA, Darwin'in evrim teorisinden esinlenilmiş, biyolojik tabanlı gürbüz bir yöntemdir. Gerek algoritma bileşenleri gerekse genetik işleçlerin uygulanması için doğru algoritmaların kullanılması ve uygun değerlerin belirlenmesi oldukça önemlidir. Algoritma işletimi süresince, nüfustaki iyi bireylerin seçilerek ve genetik işleçlere tabi tutularak daha iyi bireylerin elde edilmesi ve böylece en-uygun-çözüm kümesine yakınsama amaçlanır.

GA, evrimsel hesaplama (*evolutionary computing*) alanının arama yöntemlerinden biri olarak, yoğun bir biçimde çalışılmaktadır. Analitik bir yöntem değildir ve gerekirci kurallar kullanılmamaktadır. GA için rasgelelik söz konusudur, fakat GA tamamen rasgele olmayacak şekilde de uygulanabilir. Problem çözümünde, biyolojik tabanlı bir işleyişle (biyolojik sistemlere ait gelişim taklit edilir) yinelemeli bir süreç gerçekleştirilir.

GA, doğrusal-olmayan (*non-linear*) ve/veya doğrusal/matematiksel programlama teknikleri ile çözülemeyen karmaşık problemlerin çözümü için kullanılan esnek ve pratik bir eniyileme yöntemidir. *En iyinin hayatta kalması* prensibine dayanan GA, her biri problem için bir aday çözüm olan kromozom grubundan oluşur. Nüfustan seçilen bireyler çaprazlama işlemine tabi tutularak çocuklar elde edilir. Bu yeni bireylere mutasyon işlemi uygulanır ve bir sonraki nesil, ebeveynleri olacak bireyler seçilerek oluşturulur. Her nesilde tüm bireyler değerlendirilir ve giderek en-uygun-çözüme yakınsanır. Bitiş koşulu sağlandığında ise algoritma süreci sonlanır. Son nesildeki en iyi uygunluk değerlerine sahip bireyler çözüm olarak değerlendirilirler. GA, problemlere en-iyi-çözümü garanti etmeseler de iyi bir çözüm kümesi sunarlar.

3.3.1 Klasik yöntemlerden farkı

GA'nın en önemli avantajlarından biri, çok sayıda aday çözümü içeren çözüm kümesi mantığı sayesinde, tercih edilebilecek çok sayıda makul çözümün sağlanabilmesidir. Evrimsel süreç yinelemeli bir biçimde devam eder ve nüfus bütünsel olarak değerlendirilir. Ebeveynlerin sahip olduğu bilgiler nesiller boyunca çocuklara aktarılarak, giderek istenen sonuçlara yakınsanır.

GA, doğal evrimsel sürecin bilgisayar ortamında benzetimiyle uygulanır. Bu amaçla, bilgisayar bilimlerine ait teknolojilerden yararlanılır. Doğal seçim (*natural selection*) süreciyle (ve çevre şartlarına bağlı olarak), bireyler bir araya gelirler ve mevcut nesilde yer alan bilgi hem bireyler arasında hem de sonraki nesillere aktarılır. Verimli bir biçimde arama gerçekleştirebilmek amacıyla, çeşitlilik ve çözüm kalitesi arasındaki denge düzgün bir şekilde kurulmalıdır.

3.3.2 Gösterim

Her aday çözüm kodlanır. Kodlama için genellikle ikili (*binary*) değerler (bit tabanlı gösterim için *ikili kodlama*) veya onluk-sistemdeki rakamlar (sıralama-türü problemler için *permütasyon kodlama*) kullanılır. Nüfus içinde çok sayıda birey/kromozom vardır ve her birey birer sayısal karakter dizisinden (vektör/katar) oluşur. Bir bireyin gösterimindeki her eleman ise bit/gen olarak adlandırılır.

Yeni bir birey kodlama yaklaşımı olan rasgele sayılı kodlama, permütasyon kodlama gibi onarıcı işlemlere gerek duymaz ve modelin daha etkili ve hızlı olmasını sağlar (Dursun, 2009)¹. “0-1” aralığındaki rasgele sayılar kullanılır ve her *alel*² için atanan sayılar sıralandıktan sonra, permütasyon gösterimi elde edilir.

Başka bir kodlama türü ise değer kodlamadır. Bu kodlamada genler, gerçek sayılar, karakterler veya problem ile ilgili çeşitli ifadeler ile gösterilir.

Uygun olmayan gösterimler, GA için düşük başarıma neden olabilmektedir. Özellikle genetik işleçleri ve/veya yerel arama stratejilerini uygulamada, çözüme ilişkin gösterimlerdeki dizilimler üzerinde değişiklikler yapıldığı için probleme-özgü algoritmaların geliştirilmesi önemlidir.

3.3.3 Başlangıç nüfus

Başlangıç nüfus, tamamen rasgele veya belli ölçüde müdahale ile (örneğin çözüme yakın değerler içerecek şekilde) oluşturulabilir. Tamamen rasgelelik, yakınsama süresini büyük ölçüde uzatabilmektedir. Zeki yaklaşımların kullanılmasıyla, çözüm uzayını daha verimli bir biçimde taramak mümkün olur.

¹ Dursun (2009), zaman pencereli VRP çözümü için hızlı bir rotalama ortaya koymuştur. Rotalar belirli bir dönem için çıkarılmalıdır ve problem boyutu büyüktür. Problem GA ile modellenmiş, çözüm ise genel bir uygulama verisi üzerinde test edilmiştir.

² Alel: Her biri, bir karakterin farklı şekilde belirmesine sebep olan, tek bir gen lokusunun iki veya daha fazla sayıda olabilen alternatif şekilleri - Lokus: Belli bir gen ya da bu genin alellerinden birinin kromozom üzerinde bulunduğu düşünülen yer (Türk Dil Kurumu, 2016).

Nüfus büyüklüğünün çok küçük olması, araştırılacak aday çözümlerin azalmasına ve eşleştirilecek bireyler arasında bilgi aktarımı için yeterince alternatif olamamasına neden, yeterli çeşitliliğin sağlanmasına ise engeldir. Nüfus büyüklüğünün çok büyük olması ise algoritma işletimini oldukça yavaşlatacağı için gerekli bir durum değildir. Ayrıca, yinelemeli bir süreçle nesiller boyunca bireyler iyileştirildiği için problemin hızlı bir biçimde çözümüne yararlı değildir.

3.3.4 Uygunluğun değerlendirilmesi

Aday çözümlerin çözüme yakınlık durumlarının belirlenmesi için uygunluklarının değerlendirilmesi gerekir. Bu işlem, amaç/uygunluk işlevi (*fitness function*) ile gerçekleştirilir. Probleme ve ilgili kısıtlara göre yapılandırılan bu işlev için kromozom bir girdi, elde edilen değer ise çıktıdır. Girdi-çıkı arasındaki işlemler ise probleme-özgü (çözüme ilişkin) hesaplamaları içermektedir. Çözüm kalitesini belirlemek amacıyla kullanılan bu işlev, algoritmanın başarımında doğrudan etkiye sahiptir. Amaç işlevi farklı bileşenlerden oluşabilir ve her bileşen farklı katsayı değerlerine sahip olabilir. Karşılanan-karşılanmayan durumlar ise olumlu yönde veya ceza değeri olarak uygunluğu etkilerler.

3.3.5 Seçim

Yeni bireyler elde etmek için ebeveyn bireyler çeşitli yöntemler kullanılarak nüfustan seçilirler. Seçim, genellikle daha uygun/uyumlu bireylerin zayıf olanlara göre üstünlüğüyle sonuçlanır. Böylece, iyi bireylere ait özellikler nesil içerisinde yayılır ve daha iyi bireyler elde edilir. Seçim için rasgele seçim, rulet-tekerleği seçimi (*roulette-wheel selection*), sıralama-tabanlı seçim (*rank-based selection*) ve turnuva seçimi (*tournament selection*) gibi seçim yöntemleri kullanılabilir.

Rasgele seçim

Birey, tüm nüfustan veya belli sayıda en iyi birey arasından rasgele seçilir. En iyilerin belli bir kısmından (örneğin ilk %10'luk kısım) seçim yapılabilmesi için nüfustaki bireylerin uygunluk değerlerine göre sıralanması gerekir.

Rulet-tekerleği seçimi

Tüm bireyler, bir rulet-tekerleği üzerinde uygunluk değerlerine göre yer alırlar. Daha iyi olan bireyin seçim şansı daha yüksek olur. Öte yandan, uygunluk değerleri *çok fazla farklılık*¹ gösterir ise bazı bireylerin seçim şansı çok küçük olacaktır. Seçim yapılabilmesi için nüfustaki bireylerin uygunluk değerlerine göre sıralanması gerekir. Rulet-tekerleği seçimi (uygunluk tabanlı / maliyet seçim yöntemi), sıralama-tabanlı seçim ve turnuva seçimi yöntemlerine göre daha yavaş kalmakta; fakat daha hızlı yakınsama sağlayabilmektedir.

Sıralama-tabanlı seçim

En kötü birey 1 ve en iyi birey nüfustaki birey sayısı (N) olacak şekilde, bireyler sıra-tabanlı olarak değerler alırlar. Maliyetler yerine sıralar temel alındığı için düşük uygunluktaki bireyler daha yüksek seçim şansına sahip olurlar ve böylece çeşitliliğin azalması önlenir. Rulet-tekerleği seşimine göre daha adil bir yöntem olup, seçim yapılabilmesi için nüfustaki bireylerin uygunluk değerlerine göre sıralanması gerekir. Öte yandan, uygunluk değerleri farklarının düşük olması ise daha yavaş yakınsamaya neden olabilmektedir.

Turnuva seçimi

Nüfustan rasgele seçilen bir birey grubundaki en iyi birey seçilir. Mevcut altkümedeki en iyi olanın dikkate alınması, bu yöntemi seçkin bir seçim yöntemi yapmaktadır. Nüfusun çok büyük olması, yeterli alternatifin sağlanabilmesi için seçim yapılacak birey grubunun geniş olmasını gerektirir. Turnuva büyüklüğü iki ise bu seçim, ikili turnuva (*binary tournament*) seçimi olarak adlandırılır ve iki birey arasında gerçekleştirilir. Seçim yapılabilmesi için nüfustaki bireylerin uygunluk değerlerine göre sıralanması gerekmemektedir.

¹ Uygunluk değerleri arasında çok fazla farklılık olmasına, en iyi kromozomun uygunluğunun tüm rulet-tekerleğinin %90'ını kaplaması örnek olarak verilebilir.

3.3.6 Çaprazlama

Çaprazlama, nüfus içerisindeki bireylere ait özelliklerin birleştirilmesiyle yeni bireylerin üretilmesi için uygulanır. Bu işleç, önceden belirlenen çaprazlama olasılığı dâhilinde¹ ve genellikle iki kromozom arasında gerçekleştirilir. Genellikle, bir kromozomdaki belli bir kısım başka bir kromozomda karşılık gelen kısım ile takas edilir. Normal çaprazlama örneği Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Bit tabanlı gösterim için çaprazlama işlecinin uygulanması.

Ebeveynler	100110010010 100110101100	0011101000110 10000101001
Çocuklar	1001100100100 10000101001	001110100011 100110101100

Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi, ebeveyn bireylerden çocuk bireyler elde edilir. Literatüre bakıldığında, çaprazlama için birden fazla çaprazlama noktasının ve/veya üç kromozomun kullanıldığı da görülebilir. Çaprazlama, normal, permütasyon ve açgözlü çaprazlama (*greedy crossover*) gibi yöntemler kullanılarak uygulanabilmektedir.

Sıralama-türü problemlere ilişkin kromozom gösterimlerinde, normal çaprazlamayla, yinelenen sayılar ve uygun olmayan aday çözümler sağlanabilir². Bu nedenle, permütasyon çaprazlama uygulanabilir. Bir çaprazlama noktası belirlenir ve bu noktaya kadar olan kısım ilk bireyden kopyalanır. Geriye kalan kısım ise söz konusu elemanın yeni bireyde yer alıp almadığı kontrol edilerek ikinci bireyden alınır. Yer almıyorsa bu eleman, diğer durumdaysa bir sonraki eleman kopyalanır ve çocuk birey elde edilir.

Açgözlü çaprazlama, bir kromozomun ilk elemanını seçer, her iki kromozomda da o elemanı bırakan elemanları karşılaştırır ve yeni kromozomu tamamlamak için daha yakın olanını seçer. Bir eleman gösterimde mevcutsa diğer elemanı, iki eleman da mevcutsa seçilmemiş bir elemanı rasgele seçer.

¹ Çaprazlama ve mutasyon işleçleri, üretilen rasgele değer çaprazlama/mutasyon olasılığından daha büyük değil ise uygulanır. Olasılık değerleri, işleçlerin uygulanma sıklıklarını belirler.

² Wu et al. (2008), CVRP ile ilgili çalışmalarında çaprazlama işlecinin kullanılmamışlardır.

Çaprazlamada birden fazla kromozomun eşleştirilmesi söz konusu olduğu için bu işlecin uygulanması kromozomların gösterimine doğrudan bağlıdır. Çaprazlama uygulanmazsa, çocuk bireyler ebeveynlerinin aynıları olurlar.

3.3.7 Mutasyon

Mutasyon, arama uzayını daha fazla keşfetmek ve nüfus içerisinde çeşitlilik sağlamak için uygulanır. Bu işleç, önceden belirlenen mutasyon olasılığı dâhilinde ve genellikle gösterimdeki 0 olan değer 1, 1 olan değer 0 olarak değiştirilecek şekilde gerçekleştirilir. Normal mutasyon örneği Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2: Bit tabanlı gösterim için mutasyon işlecinin uygulanması.

Mutasyon öncesi kromozom	100110010010100110101100
Mutasyon sonrası kromozom	101110010010100100101100

Çizelge 3.2’de görüldüğü gibi, ilgili çocuk birey değişime uğrar. Mutasyon işleci, erken yakınsamalara engel olabilmek için çaprazlama işlecinden sonra ve tek kromozom üzerinde uygulanır. Bir yöne öteleme, çarpma, kırpm ve ters çevirme gibi pek çok yöntem kullanılarak mutasyon uygulanabilmektedir. Farklı bireylerin elde edilme olasılığını artırmak için mutasyon olasılığı düşük seçilmelidir. Öte yandan, mutasyon olasılığının çok düşük olması çeşitlilik kaybına, çok yüksek olması ise çok fazla değişime uğramış bireylerin (*mutants*) elde edilmesine neden olur.

Mutasyon işlecinin uygulanması, kromozomların gösterimine doğrudan bağlıdır. Örneğin permütasyon kodlamada, mutasyon için kromozomda yer alan iki gen takas edilebilir veya bu aralık ters çevrilebilir. Mutasyon çok sık uygulanırsa, algoritma rasgele aramaya (*random search*) dönüşebilmektedir.

3.3.8 Seçkincilik ve yeniden üretim

Genetik işleçlerin rasgele olmaları nedeniyle, en iyi bireyler kaybedilebilir. Bu durumdan kaçınmak ve mevcut nesildeki en iyi bireyi muhafaza etmek için belli sayıda en iyi birey doğrudan bir sonraki nesle aktarılır. Seçkincilik (*elitism*)

adı verilen bu yaklaşım, algoritmaya bir bellek-işleyişi dâhil etmek için uygulanır. Mevcut en iyi birey, daha iyi bir birey elde edilene veya algoritma işletiminin sonuna kadar korunur ve böylece algoritmada kötüye gidiş önlenir.

Bir sonraki neslin oluşturulması için nüfus büyüklüğü kadar, mevcut nesildeki ebeveyn bireyleri ve bu bireylerden elde edilen çocuk bireyleri içeren gruptan seçilen bireyler (uygunluk tabanlı yöntem) veya sadece çocuk bireyler (yaş tabanlı yöntem) kullanılır. Nüfustaki toplam birey sayısı değişmeyecek şekilde nesiller devam eder. Bir sonraki nesli oluşturmak amacıyla, bireyleri bir araya getirecek farklı yöntemler tercih edilebilir.

3.3.9 Sonlanma ölçütü

Algoritma işletimi, önceden belirlenen maksimum nesil sayısına ulaşılması, belli süre geçmesi, beklenen/bilinen uygunluk değerinin elde edilmesi veya belli nesil süresince uygunluğun değişmemesi gibi durumlarda sonlandırılır.

3.3.10 Uygulama alanları

GA, eniyileme, kısıt sağlama (dağıtım, tesis/üretim planlama ve yerleşim), modelleme, planlama ve sınıflandırma türü problemlerin çözümü için kullanılır. Görüntü işleme, makine öğrenmesi, mühendislik tasarımı ve robotbilim gibi alanlarda GA ile karşılaşılır. GA, farklı yapay zekâ yöntemleri ile uygulanabilir veya mevcut çözüm yöntemlerine uyarlanabilir. GA, pratik uygulamalardan deneysel çalışmalara, ders-sınav programlarının hazırlanmasından makinelerin yapay öğrenmelerine kadar pek çok problemin ve özellikle arama problemlerinin çözümünde kullanılabilmektedir.

3.4 Yerel Arama Stratejileri

Mevcut çözümün çevresinde yapılan arama, yerel arama olarak adlandırılır. Yerel arama, çözümü, komşuluğunu keşfederek yinelemeli bir biçimde iyileştirir (Ke and Feng, 2013). Mevcut çözümün tüm komşuları içerisindeki en-iyi-çözüm, araştırılan bölgenin yerel-en-iyi çözümüdür. Tüm komşu çözümlere bakmak

yerine, mevcut çözümü iyileştiren ilk çözüm dikkate alınabilir. Yerel arama etkili bir yaklaşımdır ve bu amaçla geliştirilen pek çok strateji vardır.

2-opt algoritmasında, kromozom, iki noktadan kırılır ve bu aralık ters yönde olacak şekilde yeniden oluşturulur (Çizelge 3.3). Bu işlem, iyileşme olduğu ve kromozom için yerel-en-iyi noktaya ulaşılmadığı sürece devam eder. Yerel-en-iyi noktalarda takılı kalmamak için özellikle TSP ve VRP türü rotalama-benzeri problemlerde uygulanır. Küçük ve orta ölçekli veri kümeleri üzerinde oldukça iyi sonuçlar elde edilebilmekte ve büyük ölçüde iyileşme sağlanmaktadır. Öte yandan, yöntem büyük ölçekli veri kümeleri için çok yavaş kalabilmektedir.

Çizelge 3.3: *2-opt* algoritmasının uygulanması.

Mevcut kromozom	a b c d e f g h i j k
2-opt uygulanmış hâli	a b c g f e d h i j k

“*k-opt*” algoritmasında, verilen bir dizilimdeki k adet kenar k adet yeni kenar ile değiştirilir. Bu işlem, *2-opt* algoritmasında iki kenarla, *3-opt* algoritmasında ise üç kenarla uygulanır. *3-opt* algoritması art arda iki kez, *k-opt* algoritması ise en fazla k kez *2-opt* algoritması uygulanarak gerçekleştirilebilir.

2.5-opt algoritması, *3-opt*’un basit bir biçimini içerecek şekilde ve *2-opt*’un komşuluğu genişletilerek uygulanır. Tek şehir, mevcut konumundan turdaki başka bir yere, mevcut iki komşu tur arasındaki bir konuma yerleştirilir.

Lin-Kernighan algoritmasında (Lin and Kernighan, 1973) ise yeni bir tur oluşturmak için alt-tur çiftlerini takas etmek söz konusudur. Bu algoritma, *2-opt* ve *3-opt* algoritmalarının bir genelleştirmesidir ve uyarlanabilir. Daha kısa bir tur bulmak için her adımda, şehirler-arasındaki kaç güzergâhın değiştirilmesi gerektiğine karar verilir. TSP çözümünde kullanılan sezgisel yöntemlerden biridir.

Or-opt algoritması, mevcut turu iyileştirmek için ilk olarak üç ardışık düğümden oluşan bir kısmı farklı bir konuma (mümkün olduğunca ters çevirerek) taşır. İyileşme sağlandığı sürece devam eden bu süreç, daha sonra iki ardışık düğümlerle ve sonrasında tek düğümlerle yinelenir.

Dizilimi değiştirme (sequence replacement) algoritmasında, uygunluğu değiştirmeden kromozomu ikiye kırıp iki kısmı birden ters çevirme söz konusudur. Böylece, yerel-en-iyi noktalara takılma olasılığı düşebilmektedir.

Başka bir yerel arama stratejisi ise *kenarların yeniden birleştirilmesidir (edge recombination)*. Mevcut bir dizi güzergâha benzer bir güzergâhı oluşturan bu işleçte, düğümleer yerine kenarlara bakılır. Yinelemeyen gen dizilimlerine sahip kromozom gerektiren TSP-benzeri problemlerde (temel uygulaması GA çaprazlaması) uygulanır. Herhangi bir ebeveyndeki her düğümün komşularını listeleyen komşuluk matrisi (*adjacency matrix*) temellidir. Bir kromozomdaki her elemanın komşu olduğu elemanları içeren kenar haritaları (*edge maps*) kullanılır.

Yerel arama, meta-sezgisel yöntemlerin tasarımında çok önemli bir rol oynar (Braysy and Gendreau, 2005; Ke and Feng, 2013). Yerel-en-iyi noktalara takılma durumları en aza indirilerek, en-uygun-çözümlere ulaşılabilir. Ayrıca yerel arama, problemlerin çözümü için GA gibi yöntemlerle melezleştirilebilir.

Yerel aramanın, yinelemeli yerel arama (*iterative local search*) ve kılavuzlu yerel arama (*guided local search*) gibi türleri de mevcuttur.

3.4.1 Yinelemeli yerel arama

Yerel aramanın başarımını iyileştirmek için meta-sezgisel bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Arama tek çözüme dayalı olarak sürdürölürken, daraltılan arama uzayında daha iyi çözümler aranır. İlk olarak, başlangıç çözüme bir yerel arama stratejisi uygulanır. Daha sonra, her yinelemede, elde edilen yerel-en-iyi çözümden bazı ara-çözümlerin oluşması sağlanır ve bu yeni çözüme yerel arama stratejisi uygulanır. Bir sonraki değişiklik adımında seçilecek çözüm için bir kabul ölçütü (örneğin oluşturulan aday çözümlerin maliyetlerindeki iyileşme) belirlenir.

3.4.2 Kılavuzlu yerel arama

Kılavuzlu yerel aramada, arama sürecinin yerel-en-iyi noktalara takılma durumlarını önlemek için yerel-en-iyi çözüme neden olan özellikler cezalandırılır.

Amaç işlevinde yer alan her özellik, bir maliyete ve cezaya sahiptir. Başlangıçta sıfır olan ceza değerleri, yerel arama stratejisi yerel-en-iyiye ulaştığı zaman artırılır. Aramanın çeşitlendirilmesi söz konusu olup, az-maliyetli ve umut verici bölgelerin aranması yoğunlaştırılır.

3.5 Melez Yaklaşımlar

Problemlerin çözümü için kesin, sezgisel ve meta-sezgisel yöntemlerin farklı şekillerdeki birleşimi ile melez yöntemler geliştirilebilir. Örneğin GA gibi bütünsel arama yapan yöntemler, yerel arama stratejileri ile desteklenerek daha gürbüz yöntemler elde edilebilir.

Moscato and Cotta (2003) tarafından önerilen taklitçi algoritmalar (*memetic algorithms*), evrimsel hesaplamanın araştırma alanlarından biri olarak, öğrenme ve yerel iyileştirme stratejileri içeren nüfus-tabanlı yaklaşımlara karşılık gelmekte ve sıklıkla kullanılmaktadırlar. GA ile aramada, doğal bir GA karakteristiği olan *erken yakınsama* nedeniyle, yerel-en-iyi noktalarda takılı kalma söz konusu olabilmektedir. Yerel arama içeren klasik GA yaklaşımı ise bu şekliyle, nüfus-tabanlı melez bir yöntem olup, taklitçi algoritma örneği olarak verilebilir. Kullanılmasıyla, erken yakınsama olasılığı azaltılabilir.

Yerel arama stratejilerini kullanan evrimsel yapılı (nesillere dayalı arama gerçekleştiren) bu algoritmalarda, evrimsel değişim, yani taklit söz konusudur. Yeni nesildeki çözümler, önceki nesildeki çözümlerden iz taşımaktadırlar ve tamamen bağımsız değildirler. Elde edilen bireyler üzerinde, beklenen sonuca göre düzenlemeler yapılabilir. GA tüm çözüm uzayında bütünsel arama yaparken, taklitçi algoritmalar ise ek olarak yerel-en-iyi çözüm uzayında da arama yaparlar.

Melez yöntemler uygulanarak, daha yüksek yakınsama hızı ve daha az sayıda nesil tekrarı ile çözüme ulaşılabilir. Bu yaklaşımların seçiminde, yöntemin karmaşıklığı ve uygulanabilirliği (*feasibility*) dikkate alınmalıdır.

4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, *engel içermeyen ortamlar* için VRP türü problemler ve *engel içeren ortamlarda* yol planlama türü problemler ele alınmıştır. Bu kapsamda, söz konusu problemlere ilişkin özel durumlardan, engellerden kaçma stratejilerinden, robotbilim alanındaki iki nokta arasındaki en kısa yolu (*shortest path*) bulma çalışmalarından ve ilgili diğer problemlerden bahsedilmiştir. Ayrıca, tez çalışmasının literatürdeki diğer çalışmalardan farkı sunulmuştur.

4.1 Engel İçermeyen Ortamlara İlişkin Yapılmış Çalışmalar

En kısa yol probleminde tüm noktalar ziyaret edilmek zorunda değildir. Örneğin s noktasından d noktasına bir dizi nokta ziyaret edilerek gidilebilir. TSP’de ise tüm noktalar ziyaret edilmelidir. Bir gezgin satıcı, tüm talepleri taşıyacak kapasitedeyse bir turda tüm şehirleri ziyaret edebilir. Bu durumda, tek araç tek rotada tüm talepleri karşılayabilir ve CVRP, bu şekliyle, TSP olarak çözülebilir. VRP’nin özel bir türü olarak çoklu TSP’de (*multiple TSP*) ise klasik TSP, kapasite sınırı olmayacak şekilde ve çok sayıda gezgin satıcı ile ele alınır. Ayrıt Rotalama Probleminde (ARP), bir postacı bir şehrin tüm yollarını bir kez ziyaret etmeli ve başlangıç konumuna dönmelidir. Konum Rotalama Probleminde (LRP) ise VRP’ye ek olarak, depo konumlarına karar verilmektedir.

Verilen bir çizge içerisindeki tüm kenarları en az sayıda düğümle kapsayacak/örtecek rota kümesini belirleme (minimum köşe örtme / kenar kapsama problemi - *minimum vertex cover problem*), mevcut potansiyel müşterilerin bir altkümesinin hizmet alması (takım oryantiring/yönbul problemi¹ - *team orienteering problem*) veya belirlenen araç rotalarının planlanması ve zaman çizelgelerinin oluşturulması (araç çizelgeleme/planlama - *vehicle scheduling*) gibi problemler bu kapsamda verilebilecek diğer örneklerdir.

¹ *Takım oryantiring problemi* aynı zamanda, müşterilerin sadece bir altkümesinin hizmet alabildiği araç rotalama problemlerinin bir genellemesidir (Li, 2012). Örneğin Bock and Sanità (2013), Öklid çizgelerinde kapasiteli oryantiring problemini ve okul otobüsü problemini ele almışlar; bu iki CVRP türevi için bazı yaklaşım sonuçları vermişlerdir.

Takım oryantiring probleminde, araçlara ait her yol n_1 konumunda başlamalı ve n_k konumunda sonlanmalı ve yol üzerindeki kenarların toplam maliyeti belirli bir sınırdan az olmalıdır (Şevkli and Sevilgen, 2012). Sınırlama nedeniyle, her araç tüm kontrol noktalarını ziyaret edemez ve kısıt sağlanacak şekilde toplam kâr en çoğa çıkarılır (*maximization*). Şevkli and Sevilgen (2012), bu problemi çözmek için parçacık sürüsü eniyilemesi tabanlı yeni bir algoritma önermişlerdir.

Tarantilis et al. (2013), VRP'ye odaklanarak kapasiteli takım oryantiring problemini ele almışlardır. Hedef, kâr ve talep bilgileri ile verilen müşteri kümesinden altkümeyi bulmaktır. Kapasite ve rota süresi kısıtları dikkate alınarak, maksimum kârla, ziyaret sıraları ve araç rotalarına yapılan atamalar belirlenir. Önerilen yöntem, farklı arama avantajlarıyla, sıradüzensel (*hierarchical*) bir çift-seviyeli arama altyapısından yararlanır: (1) üst seviyede, çözüm uzayı, toplanan kâr esas alınarak araştırılır. Bu amaçla, *filter-and-fan* yöntemi ve kâr tabanlı komşulukların birleşimi kullanılır. (2) alt seviyede ise müşterilerin rotası, değişken komşuluk iniş (*descent*) yöntemi ile seyahat mesafesinde iyileştirilir.

Şevkli (2010), rota bulma problemlerinin çözümü için iki yeni model geliştirmiştir: (1) *parçacık sürüsü eniyilemesi*, çözüm uzayını nüfusu oluşturan parçacıkların sistemli bir biçimde dolaşmasıyla tarar. Doğrudan uygulanırsa, iyi yerlerde yeterince ayrıntılı arama yapamama ve erken yakınsama zayıflıkları ile karşılaşılır. (2) bu durum, iyi yerler bulan parçacıklar için *değişken komşuluk arama* ve parçacıkların aramaya rasgele bir yerden devam ettirilmesi ile giderilmeye çalışılır.

VRP, iş çizelgeleme/planlama (*job shop scheduling*) problemi ile ilişkilidir. Her iki problem de belli kaynaklar ve belli görevler arasında dağıtım gerektirir. Çizelgeleme için belli görevler belli zamanlara, rotalama için belli müşteriler belli araçlara atanır (*assignment problem*). Örneğin rotalama için kullanılacak araçlara sürücülerinin atanması bir çizelgeleme problemidir. Bu problemlere ait bileşenler ve kısıtlar farklılıklar içermektedir. Bu nedenle bu eniyileme problemleri, farklı maliyet işlevleri temel alınarak ve farklı teknikler kullanılarak çözülür. Örneğin VRP, TSP ve kutulama problemi (*bin packing problem*) arasında yer almasına (Qureshi et al., 2012) bağlı olarak, hem araçlara atama hem de rotalama gerektirir.

Bayzan (2005), VRP’de araçların talep noktalarında bekleme sürelerinin taşıma maliyetine (aracın aldığı toplam yol) etkisini incelemek amacıyla iki yaklaşım önermiştir: talebin, geldiği anda, (1) kendisine en yakın aracın talep listesine eklenmesi ve (2) araçların gittiği noktalardan yakın olanının listesine eklenmesi. Şahin (2010) ise mevcut rotalardan bilgi edinilmesi ve VRP çözümü için veri madenciliği tekniklerinden yararlanmıştır.

Alba and Dorronsoro (2006), CVRP çözümü için hücresel (*cellular*) genetik algoritma kullanmışlardır. Wang (2012) ise CVRP için hücresel karınca algoritması kullanmıştır. Gerçekleştirdiği deneylerden elde ettiği sonuçlara dayanarak, ona göre bu algoritma, CVRP çözümünde uygulanabilir ve etkilidir.

Mazzeo and Loiseau (2004), CVRP çözümü için karınca kolonisi algoritmasını tercih etmişlerdir. Çalışkan (2011) ise VRP’nin maliyetlerinin kümeleme tekniği ile iyileştirilmesi için karınca kolonisi eniyilemesini k-ortalamar (*k-means*) tekniği ile birlikte uygulamıştır. Çalışkan (2011) ayrıca, kullanılan araç sayısı, taleplerin toplam gerçekleşme süresi ve toplam mesafe değişimlerini izlemiştir.

Ribeiro and Laporte (2012) ve Ke and Feng (2013), başka bir VRP türü olarak, kümülatif CVRP’yi çalışmışlardır. Çözüm için Ribeiro and Laporte (2012) uyarlanabilir bir komşuluk arama, Ke and Feng (2013) ise iki-aşamalı meta-sezgisel bir yöntem¹ önermişlerdir.

Cheng and Wang (2009), zaman pencereli VRP’yi (orijinal problem), ana probleme ve zaman penceresi kısıtlı bir dizi bağımsız TSP’ye (daha basit alt problemler) ayıştırmışlardır. Böylece, problem boyutu düşmüş ve daha basit çözüm yöntemlerinin kullanım imkânı söz konusu olmuştur. Genel çözüm yöntemi, ana problem (GA) ve alt problemler (basit bir sezgisel algoritma) arasında yinelemeli etkileşimler içermektedir. Sonuçlar, problemin

¹ Ke and Feng (2013): algoritma tek bir çözümle başlar ve her yinelemede, çözümün iyileşmesi için farklı yerel arama işlemleri kullanılır. Birinci aşama daha çok rotalar-arası işlemlere bağlı iken, ikinci aşamada özellikle rota-içi işlemler kullanılır.

ayrıştırılmasının, orijinal problemin doğrudan çözümüne göre, daha iyi çözüm kalitesi sağladığını (orijinal problemin çözümü giderek iyileşmiştir) göstermiştir.

Ghoseiri and Ghannadpour (2010), çok-hedefli zaman pencereli VRP için genetik algoritma tabanlı yeni bir model sunmuşlardır. İlk müşteri, söz konusu rota için seçilir. Sezgi, rotdanmamış müşteri kümesinden, zaman ve kapasite kısıtlarını ihmâl etmeden, rotadaki her kenar arasındaki toplam yerleştirme maliyetini en aza indiren müşteriye seçer. Başlangıç nüfusun büyük kısmı rasgele, kalanı ise *push forward insertion* sezgiseli ile oluşturulur. λ -takas işleyişiyle, rotalar-arası müşteriler değiştirilir ve komşuluk çözümü üretilir. Kromozom uygunluk değerleri ise *Pareto* sıralaması ile değiştirilir.

Luo and Chen (2014), çok-depolu VRP'yi (ayrıca zaman aralıkları ile) çözecek iyileştirilmiş bir çözüm yöntemini ve çok-aşamalı modelini sunmuşlardır. Bu problemde depolar, müşteri kümelerinin ağırlık merkezleri (tüm müşteriler için) olarak değerlendirilirler. Bir önceki süreç ile ulaşılan en-iyi-çözüme göre, yeni kümeler üretecek kümeleme çözümleri (*clustering analyses*) gerçekleştirilir. İyileştirilen yol bilgisi yeni kümelere aktarılır. Çok-depolu araç rotalama problemlerini çözmek için Yücenur and Demirel (2011), genetik algoritma ve karınca kolonisi eniyilemesi içeren melez bir algoritma kullanmışlardır. Ho et al. (2008) ise çok-depolu VRP'nin verimliliği için iki melez genetik algoritma kullanmışlardır. Onlara göre, başlangıç için melezleştirilmiş sezgisel yöntemler çözümlerin kalitesine büyük ölçüde yön vermektedir.

Subramanian et al. (2013), homojen-filolu VRP sınıfı için melez bir algoritma önermişlerdir. Algoritmalarını, CVRP, asimetrik VRP, açık VRP, eş-zamanlı dağıtım-toplamalı VRP, karışık dağıtım-toplamalı (çok-depolu) VRP ve çok-depolu VRP örnekleri üzerinde kapsamlı bir şekilde test etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, sezgisel yöntemlerle bulunan ilgili türevlere göre oldukça rekabetçidir. Ayrıca bir dizi yeni en-iyi-çözüm elde etmişlerdir.

Lewis and Sexton (2007), CVRP çözümü için tur bölümlleme (*tour partitioning*) kullanmışlar ve araçların sınırsız kaynağı olduğunu varsaymışlardır. Araç sayısı sabit olduğunda ise *olanaksız çözümler*¹ üretilebilmektedir.

CVRP için Stanojević et al. (2013), daha iyi rotalar üretmek amacıyla rotaları birleştiren yeni bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir². Wang and Lu (2009) ise çaprazlama ve mutasyon olasılıklarının en uygun birleşimi ile yeni bir melez *genetik algoritma*³ önermişlerdir. Lin et al. (2009), melez meta-sezgisel yöntemler uygulamışlar; Berger and Barkaoui (2003) ise melez bir genetik algoritma önermişlerdir. Yurtkuran and Emel (2010) ise nüfus-tabanlı melez bir yöntem kullanmışlar, yeni bir yerel arama stratejisi olan yinelemeli takas yaklaşımıyla (*iterative swap procedure*), elde edilen çözümleri iyileştirmişlerdir. Yaklaşım, seçili ebeveynin konum vektöründen rasgele iki bileşen seçer ve değerleri takas eder. Bu bileşenlerin komşuları değiştirilerek dört çocuk daha oluşturulur ve en iyi çocuk, ebeveyninden daha iyi ise ebeveynle değiştirilir.

Araç rotalamada, Ralphs (2003), Berger and Barkaoui (2004) ve Le Bouthillier and Crainic (2005) paralel yaklaşımlardan yararlanmışlardır. Jin et al. (2014) ise CVRP için işbirlikçi-paralel meta-sezgisel bir yöntem önermişlerdir. Yöntem, ortak çözüm havuzunda bulunan en-iyi-çözümleri, eş-zamanlı olmayan bir biçimde takas eden çoklu-paralel tabu arama iş-parçacıklarından (*threads*) oluşmaktadır. Havuza gönderilen çözümler benzerliklerine göre kümelenirler. İş-parçacıklarının yoğunlaştırılması ve çeşitlendirilmesini yönlendirmede ise çözüm kümelerine ilişkin arama-geçmiş bilgisi uygulanır.

¹ Araç sayısının sabit olduğu durumlarda, çözümdeki rota sayısı bu değerden büyük (daha fazla araç kullanılmak zorunda) ise bu çözüm olanaksız çözüm olarak değerlendirilir.

² Stanojević et al. (2013): genişletilmiş algoritma, dinamik olarak yineleme süresince tasarrufu yeniden hesaplar. Daha iyi çözüm için hangi rotaların birleştirileceği incelenir. Araç kapasitesi küçük olduğunda, her yinelemede daha az uygun birleştirme mevcut olur ve nihai çözümde (daha az yineleme ve düşük çalışma zamanı söz konusu) daha fazla rota yer alır.

³ Wang and Lu (2009), iyi yapılandırılmış kromozom nüfusu elde etmek amacıyla, başlangıç nüfusu üretmede, merkeze göre eksensel ve yarıçapa ilişkin (*radial*) ilişkileri dikkate almışlardır. Çalışmada ayrıca, süpürme algoritmasına en yakın ekleme yöntemi dâhil edilmiştir.

Du and He (2012), büyük ölçekli VRP için yeni ve etkili bir melez meta-sezgisel algoritma sunmuşlardır. Algoritma, en yakın komşuluk aramanın ve tabu aramanın iyi yönlerini iki-aşamalı bir yaklaşımda birleştirmektedir: (1) başlangıç rotalar oluşturmak için en yakın komşuluk arama kullanılır ve (2) rotaları rota-içi ve rotalar-arası takas ile iyileştirmek için tabu aramadan yararlanılır.

Genelleştirilmiş VRP, klasik VRP'nin doğal bir uzantısıdır (Pop et al., 2013). Bu problemde, müşteriler bölümlere (grup/küme) ayrılır ve araç filoları için minimum uzunlukta rota kümeleri tasarlanır. Kapasite kısıtlarına bağlı olarak, depodan çıkılır ve depoda sonlanır ve her gruptan tam olarak bir müşteri ziyaret edilir. Yerel-bütünsel bir yaklaşımla, GA ve güçlü bir yerel arama yaklaşımı birleştirilerek, verimli bir melez sezgisel algoritma sunulmuştur.

Araç rotalamaya ilişkin belirli nitelikler için son yıllarda yüzlerce yöntem tanıtılmıştır (Vidal et al., 2014); fakat varyasyonlarının geniş bir kümesine, hem verimli hem de uygulanabilir, basit ve genel-amaçlı bir algoritmanın geliştirilmesi son derece zordur. Vidal et al. (2014) için araç rotalamanın çözümüne ilişkin nitelikler, problemi tamamlayıcı ek karakteristikler ve kararlardır. Bu zorlukları ele almışlar ve çok-nitelikli/amaçlı (*multi-attribute*) araç rotalama problemlerini hedeflemişlerdir. Çalışmada, zor VRP varyasyonlarının pek çoğunu ele almada, *problemin yapısına uygun olarak tasarlanmış bileşen-tabanlı (component-based)* yeni bir sezgisel çatı önerilmiştir. Ayrıca, *tümleşik (unified)* bir melez genetik-arama tanıtılmıştır. Verimli ve genel-amaçlı bu meta-sezgisel yöntem, problem-den-bağımsız yerel arama, genetik işlemler ve birtakım yöntemler kullanır.

Leung et al. (2013), müşterilerin, iki-boyutlu yüklemeyle ve farklı kapasitedeki araç filosu kullanılarak hizmet aldığı problem için sezgisel yerel arama ve tavlama benzetimi önermişlerdir. Her yeni çözüm için yüklemenin yapılabilirliğini kontrol edecek sezgisel yöntemler ve arama sürecini hızlandırmak için yüklemenin yapılabilirliği ile ilgili bilgiyi kaydedecek bir veri yapısı kullanmışlardır. Onlara göre, belirsiz bir rota incelendiğinde, depolanmış bilgiyi getirmek kolaydır. Bu rota mevcut değilse, bilgi kaydedilir.

Bortfeldt (2012), CVRP'yi üç-boyutlu yükleme ve ek kutulama kısıtlarıyla ele almıştır. CVRP genelleştirmesi olan bu problemde, müşteri taleplerinin üç-boyutlu, dikey ve yığılanabilir kutulardan oluştuğu varsayılmaktadır. Bortfeldt (2012), rotalama için tabu arama ve araçlara atama için ağaç arama algoritmalarını içeren verimli bir melez algoritma tanıtmıştır. Rotalama yaklaşımındaki hareketler, kutulama açısından uygunluğu kontrol edilmeden önce değerlendirilir. Böylece, iyi çözüm kalitesi için gerekli kutulama çabası önemli ölçüde azalır.

Ruan et al. (2013), üç-boyutlu yükleme CVRP'yi ele almışlardır. Tüm araçların merkezî bir depoyu temel aldıkları bu problem, araçlar için *uygun yükleme ve başarılı rotalamayı* eniyilemeyi gerektirir. Bal arısı çiftleşme eniyilemesi (*honey bee mating optimization*) ve altı yükleme sezgisini birleştiren melez bir yöntem sunulmuştur. Bütünleşik problemi çözmede, biri araç rotalama ve diğerleri üç-boyutlu yükleme için kullanılmıştır. Üç-boyutlu yükleme ve araç rotalamanın önemli bir birleşimi olan bu problem, Fuellerer et al. (2010) tarafından da çalışılmıştır. Onlar, yükün araçlara yüklenmesi ve yol ağı (*road network*) üzerinde araç rotalamanın birleşiminin eniyilemesini amaçlamışlardır. Onlara göre, yüksek karmaşıklığı nedeniyle, bu problem üzerinde literatür çok sınırlıdır. Problem, yükleme için hızlı kutulama sezgilerini kullanan karınca kolonisi eniyilemesi kullanılarak çözülmüştür. Algoritma, rotalama ve kutulama olarak iki farklı sezgi bilgisini birleştirmektedir.

Ceschia et al. (2013) ise üç-boyutlu yükleme CVRP'nin bir uzantısı olarak, rotalama ve kutulamayı bütünleştiren karmaşık bir problemi ele almışlardır. Toplam rotalama maliyeti en az olacak şekilde, öğeler yükleme kısıtlarına uygun olarak kutulanırlar ve müşteri taleplerini karşılayan bir rota kümesi bulunur. Ek olarak, ayırık teslimatların olma olasılığı da dikkate alınmıştır. Basit bir aşamada tüm problemi ele alan, tavlama benzetimi ve komşuluk aramayı birleştiren bir strateji tabanlı yerel bir arama yaklaşımı önermişlerdir.

Cacchiani et al. (2014), bir VRP genelleştirmesi olarak, periyodik VRP'yi ele almışlardır. Bu problem, verilen planlama diliminin her günü için minimum-maliyetli rota kümesini belirlemeyi içermektedir. Her müşteri, gereken sayıda ziyaret edilmeli ve gerekli ürün miktarını her seferinde almalıdır. Ayrıca, gün

başına düşen rota sayısı toplam kullanılabilir araç sayısını geçememektedir. Rotalama problemleri için birkaç günlük planlanmalar hesaba katılmaktadır.

Hà et al. (2014), araç sayısı bir karar değişkeni olacak şekilde, esnek filo büyüklüklü (*with flexible fleet size*) genelleştirilmiş VRP'yi ele almışlardır. Bu problemde, uygun filo büyüklüğü günlük rotalama maliyetini en aza indirmek amacıyla belirlenebilmektedir.

Tlili et al. (2014), araçların belirlenen maksimum uzunluğa kadar seyahat edebileceği mesafe kısıtlı (*with distance constraints*) CVRP için parçacık sürüsü eniyilemesi ile değişken komşuluk aramayı bütünleştiren sürü zekâsı tabanlı melez meta-sezgisel bir yöntem önermişlerdir.

Kuo et al. (2012), sınırlı literatüre sahip bulanık talepli (*with fuzzy demands*) CVRP'yi çözmek için GA ve melez parçacık sürüsü eniyilemesini ele almışlardır.

İşleyen (2008), müşteri taleplerinin normal dağıldığı rasgele talepli VRP'yi ele almıştır. Verilen bir başlangıç turunun beklenen uzunluğunu hesaplayan yeni bir işlev önermiştir. Çalışmasında, herhangi bir aracın mevcut kapasitesine ulaşıldığı veya bu kapasite aşıldığı durumda, aracın depoya geri dönüp yükünü tamamlaması ve kırılmanın gerçekleştiği müşteriye geri dönüp turuna devam etmesi yaklaşımını kullanmıştır.

Marinakakis et al. (2013), rasgele talepli VRP'yi başarılı bir biçimde çözmek için parçacık sürüsü eniyilemesi tabanlı yeni bir melez yöntem tanıtmışlardır. Bu problemde, sonlu kapasiteli bir araç, tam yüklemeyle depodan ayrılır ve sadece onlara ulaştığında talepleri bilinecek bir dizi müşteriye hizmet vermek zorundadır. Lei et al. (2011) ise taleplerin rasgele olduğu ve her köşeye bir zaman penceresinin uygulandığı CVRP'yi ele almışlardır. Gerçekleşen talep araç kapasitesini aştığı zaman, aynı rotadaki düğümlerde başarısızlık olabilir. Problem, rasgele bir problem olarak modellenmiş ve çözüm için uyarlanabilir bir geniş çerçevede komşuluk arama önerilmiştir.

Fung et al. (2013), yönlü/yönsüz bir ARP'yi eşdeğer bir VRP'ye dönüştürecek pek çok yöntem geliştirmişlerdir. Longo et al. (2006) ise Kapasiteli ARP'nin (CARP) çözümü için CVRP'ye dönüşümü kullanmışlardır.

CARP, bir ağdaki gezilmesi gereken tüm ayrıtlara, kapasite kısıtlı araçlarla ve toplamda en küçük maliyetli olacak şekilde hizmet verecek araç turlarının belirlenmesi olarak tanımlanır (Kirlık, 2009). Kirlık (2009), araçların hizmet vermeden geçtiği ayrıtlarda da kapasite kullandığı yeni bir CARP türünü incelemiştir. Ayrıtlar talebi, ayrıta hizmet verilip verilmemesine göre değişir. Problemi *değişken ayrıtlar talepli* CARP olarak adlandırmış ve matematiksel bir model geliştirmiştir. Tanımladığı problemin büyük-boyutlu problemlerde çözülebilmesi amacıyla, CARP için önerilmiş bir bölümlendirme sezgiselini probleme uyarlamış ve bir genetik algoritma önermiştir. Ayrıca, CARP için önerilmiş test problemlerini probleme uygun hâle getirip sınamıştır.

Monroy et al. (2013), VRP'nin düğüm rotalama (*node routing*) ve ayrıtlar rotalama olarak iki sınıfa sınıflandırılabilceğini ifade etmişlerdir. Ele aldıkları düzensiz servisli (*with irregular services*) periyodik CARP, bir zaman dilimi üzerinden verilen bir ağı örtecek rota kümesini belirlemeyi içerir ve zamanın alt periyotlarında yollara birkaç kez hizmet verilmelidir. Probleme ilişkin olarak, matematiksel bir model ve sezgisel bir çözüm yöntemi sunmuşlardır.

Göksal (2010), eş-zamanlı dağıtım-toplamalı VRP çözümü için iki melez algoritma önermiştir: (1) GA ve değişken komşuluk iniş algoritması ve (2) kuş sürüsü ve değişken komşuluk iniş algoritmaları. Geliştirdiği melez algoritmalarda, nüfus tabanlı GA ve kuş sürüsü algoritması çözüm uzayında araştırma yaparken; yerel arama tabanlı değişken komşuluk iniş algoritması ise arama sırasında bulunan çözümler etrafında derinlemesine arama gerçekleştirir.

Hezer (2010), eş-zamanlı dağıtım-toplamalı VRP'yi çalışmış; bakteriyel besin arama eniyilemesi algoritması (*bacterial foraging optimization algorithm*) tabanlı sezgisel bir çözüm yöntemi geliştirmiştir.

Gerdan (2007), müşteriler-arası malzeme akışlı eş-zamanlı dağıtım-toplamalı VRP'yi çalışmıştır. Malzemelerin depodan müşterilere taşınması ve buradan aynı zamanda depoya ve diğer müşterilere gidecek malzemelerin de alınması söz konusudur. Çözüme ilişkin sezgisel bir algoritma önermiştir.

Karaoğlu (2009), dağıtım ağlarının tasarımı kapsamında, tesislerin yer seçimi ve rotalama kararlarını dikkate almıştır. Yer seçimi ve eş-zamanlı dağıtım-toplamalı VRP'yi çalıştığı bu problemde, tesislerin yerinin seçimini ve bu tesislerden müşterilerin dağıtım ve toplama taleplerinin aynı araçla karşılanmasını gerçekleştirir. Hem depodan müşterilere hem de müşterilerden depoya taşıma söz konusu olup, dağıtım maliyetini en aza indirmeyi amaçlamıştır.

Tabak (2008), ETİ Gıda A.Ş.'nin personel servis güzergâhlarını belirleyen bir karar destek sistemi oluşturmuştur. Çalışanların bilgileri ve servis durakları veri tabanında yer almaktadır. Durak yerleri *MapInfo* programı ile harita üzerinde işaretlenmiş, kümeleme yöntemi ise GA ile uygulanmıştır. Vardiyalara göre en kısa yol, uygun servis sayıları ve dolaşım süreleri belirlenmiştir. Ayrıca, genetik algoritma sonuçlarına yerel iyileştirmeler uygulanarak, her servisin güzergâhı, kapasite ve dolaşım süreleri kısıtları aşılmayacak şekilde düzenlenmiştir.

Çiçekdeş (2011), vaka çalışması olarak, bir otomotiv firmasının günlük dağıtım problemini ele almış; karar verici için etkili bir çözüm algoritması tasarlamayı amaçlamıştır. Mevcut sistem ve dağıtım planlama (*distribution planning*) sürecine bağlı olarak, heterojen kapasiteli VRP'yi çalışmıştır. İlk olarak, problemin matematiksel modelini karma-tamsayılı programlama ile formüllemiş; sonrasında, problemin çözümü için özgün bir genetik algoritma geliştirmiş ve MATLAB'de programlamıştır. Deneysel sonuçlar, geliştirilen algoritmanın iyi başarımlar gösterdiğini ve daha kısa sürelerde kaliteli sonuçlar üreterek, söz konusu firmanın başarımlar hedeflerini karşıladığını göstermiştir. Algoritma, karar vericiye alternatif dağıtım planlarını değerlendirme imkânı sunmakta ve ayrıca zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır.

Literatürde, rotalama-benzeri problemler için çok sayıda varyasyon ve özel durum olduğu görülebilir. Ayrıca bu kapsamda farklı problemler de vardır.

4.2 Rotalama Problemlerine İlişkin Özel Durumlar

Elinas (2009), verilen bir delim örüntüsündeki (*pattern*) delikleri delme sırasını bulma problemini ele almıştır. Delik örüntüsü delme (*hole pattern drilling*) problemi, bu şekliyle, bir ardışık sıralama (*sequential ordering*) problemidir (asimetrik TSP türü) ve öncelik sırası kısıtları vardır: örneğin tüm turlar için bazı şehirlerin diğerlerinden önce ziyaret edilmesi. Elinas (2009), otonom delik delme işlemi için çok-hedefli planlama amacıyla, çözüm için genetik algoritma ve hareket planlama benzetimlerinden oluşan yinelemeli bir yöntem sunmuştur. Yöntem, herhangi iki delik arasındaki doğru maliyeti belirlemek amacıyla kullanılır. Bir yol haritası ve sorgu verildiğinde, başlangıç ve bitiş durumlarını bağlayan güzergâhı verimli bir biçimde aramada A* algoritması kullanılmaktadır. Maliyet ise hareket planlama aşaması ile tahmin edilmektedir.

Janoušek and Faigl (2013), sınırlı görünürlük menzilineki bir kamera kullanarak, verilen nesne kümesinin kapsanacağı (*coverage planning*) uygun ve az-maliyetli güzergâhı belirlemek için bir planlama problemini ele almışlardır.

Uğur (2008), tüm şehirler (noktalar üç-boyutlu uzayda) ve çözüme ait güzergâhlar dikdörtgenler prizmasına ait yüzeyler üzerinde olacak şekilde, TSP'yi dikdörtgenler prizması üzerinde ele almıştır. Bu problemde, bir satış elemanı (karınca, örümcek veya robot), sadece tüm şehirlerin yer aldığı dikdörtgenler prizması yüzeyleri üzerinde dolaşabilir. Uğur (2008), tüm şehirleri ziyaret eden en uygun rotayı bulmayı amaçlamış, bu özel üç-boyutlu TSP'yi çözmek için GA ve 2-opt algoritması tabanlı melez bir yöntem önermiştir.

Chang et al. (2014), felaket mağdurlarına yardımın acil ve verimli sevkini (teslim zamanının ve taşıma maliyetlerinin en aza indirilmesi) sağlamayı amaçlamışlardır. Ele alınan (*emergency logistics scheduling*) problem VRP'ye benzemektedir. Açgözlü arama (*greedy search*) tabanlı çok-hedefli bir genetik algoritma önermişlerdir. Önerilen algoritma, mevcut kaynakların dağıtımı ve karar vericiler için çeşitli uygulanabilir acil durum lojistik programlarının otomatik olarak üretilmesini düzenleme kapasitesine sahiptir. Ayrıca, kaynaklar için yerine

getirilmemiş talebin, talep noktalarındaki gereksinimlere göre, çeşitli besleme noktalarından dinamik olarak dağıtım zamanlamalarını da ayarlar.

Schittekat et al. (2013), VRP'nin bir varyasyonu olarak, okul otobüsü rotalama problemini tanımlamışlardır. Onlara göre, problemin en basit biçimi iki önemli alt problemden oluşur: (1) otobüs rotası üretilmesi ve (2) otobüs durağı seçilmesi. Toplam seyahat mesafesini en aza indirmede ise üç eş-zamanlı kararın verilmesi gerekir: (1) ziyaret edilecek durak kümesi, (2) her öğrencinin yürümesi gereken durak ve (3) seçilen duraklar boyunca uzanan rotalar. Öğrencilerin duraklara atanması alt problemini, rotalar verildiğinde, en-uygun-şekilde (*optimally*) çözecek meta-sezgisel bir algoritmadan yararlanılmıştır.

Da Silveira et al. (2013), boşaltma kısıtlarıyla şerit paketleme (*strip packing*) problemini ele almışlardır. Bu problemde, sabit genişlikte ve sınırsız yükseklikte bir şerit ve C farklı sınıftan n öge verilir ve kullanılan yüksekliği en aza indirerek, tüm öğelerin kutulanması istenir. Ek kısıt ise daha yüksek sınıfların öğelerinin daha düşük sınıf öğelerini engelleyememesidir. Onlara göre problem, iki-boyutlu yükleme CVRP'nin alt problemidir. Tüm müşterileri kapsayan minimum-maliyetli rota kümesini oluşturmanın bir yolu, boşaltma-kısıtlı problemi çözmek ve üretilen kutulama yüksekliğinin, kabul edilir maksimum yükseklikten fazla olmamasıdır. Her rota geçerli bir kutulama sağlamalı; bir rotanın her ögesi, kutulama kısıtlarını ve yeni boşaltma kısıtını sağlayarak, bir araçta kutulanmış olmalıdır. Boşaltma kısıtı ise bir müşterinin öğelerini teslim ederken, bu öğeleri rota üzerinde engelleyen başka müşteri öğelerinin mevcut olmamasıdır.

Brimberg et al. (2014), sürekli konum problemlerini çözmek için yeni bir yerel arama yaklaşımı önermişlerdir. Her yinelemede, yerel-en-iyiye ulaşana kadar, sürekli uzayda yerel arama gerçekleştirilir. Sürekli aşamada elde edilen yeni potansiyel konumlar, ayrık yakınsamanın niteliğini iyileştirmek için ayrık uzaydaki (sürekli modele karşılık gelen) potansiyel konumlar kümesine eklenir. Ayrık uzayda bulunan iyileştirilmiş çözüm, sürekli uzayda başlangıç çözüm olur. Bu süreç, her iki uzayda da daha iyi bir çözüm bulunmayana kadar devam eder.

Martínez-Salazar et al. (2014), ulaştırma LRP için yerel arama tabanlı yöntemler ve evrimsel yöntemler kullanmışlardır. Çalışmalarında, iki hedefi dikkate almışlardır: (1) dağıtım (ürünlerin ulaştırılması) maliyetinin azaltılması ve (2) rotalama aşamasında (müşterileri ziyaret edecek araç rotalarının tasarımı) sürücüler için iş yükünün dengelenmesi. Önceliklere dayalı olarak önerdikleri yeni bir gösterimle, tüm klasik VRP ve *n-opt* uygulamaları gerçekleştirilebilir.

Derbel et al. (2012), çok kapasiteli depolar ve depo başına bir kapasitesiz araçla LRP'yi ele almışlardır. GA ve GA ile sağlanan çözümleri iyileştirecek yinelemeli yerel arama içeren melez bir yöntem tanımlamışlardır. Onlara göre, LRP'yi (çalışmada CVRP uzantısı) çözmek için tesis *yerleşimi / yeri seçimi* (*facility location*) problemi (üst problem) ve VRP (alt problem) çözümlmelidir. LRP, her müşteri doğrudan tesise bağlıysa klasik konum probleminin özel bir durumu olur; fakat depolar konumlanmışsa VRP'ye indirgenir. Yerel aramada komşuluklar (N_1, N_2, N_3, N_4) kullanılmıştır:

- N_1 için iki farklı depoya atanan iki müşteri rasgele seçilerek takas edilir: karşılık gelen rotalar değiştirilir, ama bu rotalardaki müşteri sayısı ve sırası değiştirilmez.
- N_2 için bir rotadaki müşteri başka bir rotaya yerleştirilir.
- N_3 için dikkate alınan rotadaki iki müşterinin konumları takas edilir.
- N_4 için aynı rotadaki iki diğer müşteri arasına bir müşteri yerleştirilir.

Bu süreç (Derbel et al., 2012), dört komşuluk yapısının yerel-en-iyi noktasına ulaşılan kadar devam eder. Bu komşuluklar açık depolar için söz konusudur. Farklı çözümler için kapalı bir depoyu açma da dikkate alınmıştır. Yinelemeli yerel aramayla, her seferinde yeni bir çözüm üretilir. Açık bir depo rasgele seçilir ve açık/kapalı başka bir depoya zaten atanmış müşteriler silinir. Ayrıca, bazı depoları açma/kapatma ile yeni çözümler de üretilebilmektedir.

Rotalama, yol planlama ve en kısa yolu bulma türü problemlerde kullanılacak araçlar, ambulans (vb. acil durum aracı), gezgin robot, gezgin satıcı, helikopter, kamyon, postacı, taksi veya tır olabilmektedir. Bu problemlerin ele alındığı ortamlar ise engeller içerebilmektedir.

4.3 Yol Planlamada Engellerden Kaçma Çalışmaları

Robotbilimde engellerden kaçma, çarpışma ve kesişme durumları önlenecek şekilde konum kısıtlarının sağlanmasını amaçlar. Bu kapsamda ise gezgin robotlar pek çok amaçla kullanılmaktadır:

- Binaların temizlik işleri
- İnsansız hava araçlarından yararlanılan durumlar
- Nesne toplama ve dağıtım işleri
- Patlayıcıların tespit ve imha edilmesi
- Tarımsal alanda ekim ve ilaçlama
- Tatbikat ve savaş alanlarında keşif gibi askerî amaçlar

Robotların izleyecekleri yörüngelerin ve ilgili yönlendirmelerin belirlenmesi için engellerin dikkate alınması, belli rotalama işlemlerinin planlanması ve art arda ziyaret edilecek konumları içeren güzergâhların tespit edilmesi gerekir. Bu şekliyle yol planlama, VRP türü problemlerle bağlantılıdır.

Gezgin robot uygulamalarında robot, çarpışmalardan ve engellerden kaçarak ve en kısa yolu alarak belli hedefe ulaşabilmelidir. Bir gezgin robotun, başlangıç noktasından hedef noktasına en kısa yol ile gidebilmesi, yol planlama (en-uygun-güzergâhın belirlenmesi) gerektirir. Bu problem, ortam robot tarafından tam olarak biliniyorsa bütünsel yol planlama (statik ortamlar, özel bir türü TSP), diğer durumda (dinamik ortamlar) ise yerel yol planlamadır. Ayrıca ortam, engeller içerebilir ve robot tarafından yeterince bilinmiyor olabilir.

Robotbilimde yol planlama eniyileme problemi, ortamdaki diğer nesnelerle çarpışmadan, otomatik olarak karar verip bir dizi hareket gerçekleştirmeyi amaçlar (Parvez and Dhar, 2013). Hareket planlama (*motion planning*), otonom sualtı araçların gezinimi, yol ağı izleme uygulamaları ve yol bakım işlemlerinde de hem rotalama hem de engeller söz konusu olabilmektedir.

Lirov (1987), yol planlama problemlerine çözüm olarak, Öklid uzayında en kısa çarpışma-serbest (*collision-free*) güzergâhları hesaplayacak iki algoritma

sunmuştur. Engeller, toplamda n düğümle, parçalı/ayrık dışbükey çokgen olarak tanımlanmakta ve A^* arama algoritması ve Dijkstra'nın Algoritması kullanılmaktadır. Görünürlük çizgesi mümkün olduğunca seyrek olduğundan, en kısa yol arama algoritması en az çalışma zamanını gerektirir. Ona göre, pratik uygulamalarda bir planlama algoritması seçmede, üç ölçüt önemli rol oynar: sonuç güzergâh, (1) verilen iki noktayı bağlamalı ve engellerden kaçmalı, (2) olabildiğince kısa olmalı ve (3) olabildiğince hızlı bir biçimde hesaplanmalıdır.

Shaikh and Dhale (2013), ambar/depo içerisinde çalışan otomatik güdümlü/kılavuzlu araçlar (*automated guided vehicles*) için en uygun rotaları üretecek bir rotalama algoritması (dinamik rota planlama algoritmalarından Dijkstra'nın en kısa yol algoritması ve GA) önermişlerdir. Her araç, bir başlangıç konumu ve oryantasyonu ile başlar ve en kısa yolu üreterek ve engellerden kaçarak, önceden belirlenmiş konuma ve oryantasyona hareket eder. Dijkstra'nın Algoritması kullanılarak hesaplanan rota üzerinde engel tespit edilirse, iki düğüm arasındaki yeni yol tekrar hesaplanır. Ambarın üç-boyutlu modeli temel alınarak iki-boyutlu harita üretilir. Yükleme miktarına bağlı olarak, yükleme için gerekli araç sayısı seçilir. Ayrıca, pozisyona bağlı olarak, görev için en yakın araç tahsis edilir. Böylece, en kısa yolu bulmada zaman en aza indirilebilir.

Xidias and Azariadis (2011), otonom kılavuzlu bir araç filosu için araç rotalama ve planlama ile hareket planlamayı birleştiren genel bir yaklaşım önermişlerdir. Değişik hızlara sahip araçlar, iki-boyutlu bir ortamdaki tüm iş istasyonlarına hizmet verirler. Araçların hareketleri süresince, hareket ile ilgili kısıtlar ve ortamın geometrisi dikkate alınır. Hedef, tüm araçlar için en-uygun-zamanlı (*time-optimum*) ve çarpışma-serbest güzergâhların eş-zamanlı bir biçimde belirlenmesidir. Problem (*mission design problem*), probleme-özgü kodlamaya (tamsayı ve gerçek-değer kısımları söz konusu) sahip bir genetik algoritma ile çözülür. Seyahat süresince, engellerle ve araçların birbiri ile olan çarpışmalardan kaçacak şekilde, en kısa toplam seyahat zamanı (en yavaş araca ait) belirlenir.

Coleman and Wunderlich (2008), engellerden kaçmak için minimum ağırlıklı *Hamiltonian Circuits*, A^* algoritması ve bütünsel-en-iyi güncelleme için yerel noktalar kullanmışlardır. Amaç, otonom robotlar için yol planlamaya en-

uygun-çözümü bulmaktır. Bütünsel-en-iyi yol, engellerden kaçarak ve yerel noktalardan yararlanarak bulunur. Ayrıca, statik ortamlarda arama algoritmalarını hızlandırmak için çevresel haritalama kullanılmıştır.

Wavereen and Rothkrantz (2008), üç-boyutlu çokgensel engeller (statik veya dinamik) içeren bir ortamda yol ve rota bulmak için otomatik bir sistem sunmuşlardır. Gerçek-zamanlı yol bulmada, çok sayıda robotun sistemi eş-zamanlı bir biçimde kullanabilmesi söz konusudur.

Lozano-Pérez and Wesley (1979), bilinen çok-yüzlü (dışbükey olarak modellenmiş) nesnelerin arasında hareket eden çok-yüzlü bir nesne için güvenli bir yol planlayacak ve çarpışmalardan kaçacak (*collision avoidance*) bir algoritma tanımlamışlardır. Yol üzerinde engellerle karşılaşılan durumlarda, yeni bir yol önerilir. Çalışmada, çarpışmalardan kaçma probleminin daha genel bir biçiminin, kullanılan görünürlük çizgesine nasıl indirgenebileceği gösterilmiştir.

Thakur et al. (2013), çok robotlu bir gözetim/izleme (*multiple robot surveillance*) problemini ele almışlardır. Ziyaret edilmesi gereken farklı geçiş noktaları vardır ve engellerden kaçarak bu ara noktalar üzerinden güzergâhlar planlanırken, robotlar belirli zamanlarda hedef noktalara ulaşmalıdırlar. Hangi konumların hangi robotlar tarafından ziyaret edileceği, ziyaret sırası ve ara noktalar arasındaki güzergâhların dinamik olarak uygun olabilmesi ele alınır. Çok sayıda robota ait dinamik kısıtlarla, çalıştıkları oryantiring ve takım oryantiring problemlerini bir çizge arama (*graph search*) problemi olarak ele almışlardır. Her robotun seyahat açısından sınırlı yakıt veya uçuş zamanı kapasitesi olduğundan, her geçiş noktasının ziyaret edilmesi mümkün olmayabilir.

Thakur et al. (2013), çok sayıda robotla, ziyaret edilmemiş geçiş noktası sayısının en aza indirilmesini amaçlamışlardır. Problem, her biri eş-zamanlı bir biçimde gerçekleştirilen üç hesaplama aşamadan oluşur: (1) geçiş noktalarının robotlara tahsis edilmesi, (2) her robot için ziyaret sırasının belirlenmesi ve (3) her geçiş noktası çifti arasındaki yolun hesaplanması (yol planlama problemi). Geçişler arasındaki maliyetlerin verildiği ve her robota ilişkin tüm geçiş noktası çiftleri için en-uygun-güzergâhların planlanabileceği varsayılmamaktadır.

Algoritma, tüm planlama zamanını eniyiler. Başlangıç-hedef arasında minimum-maliyetli yolu bulmak için çizge üzerinde A* arama yapılır.

Polimeni and Vitetta (2012), kargo/nakliye araçları için bütünleşik bir ağ ve araç rotalama eniyilemesi önermişlerdir. En iyi ağ yapılandırmasını (bağlantı topolojisi) ve araçlara ait en iyi rotaları bulmak için sezgisel bir yaklaşım kullanmışlardır. Ağ eniyileme problemi (*network optimization problem*), mevcut bir ağdaki toplam gecikmeyi en aza indirmek amacıyla, en-uygun-yapılandırmayı bulmaktan oluşur. Çalışmada, bu iki problem iki-aşamalı bir problem olarak sunulmuştur: (1) VRP'nin girdileri, araçlar için yol ağı ve ilgili dağıtım/toplama işlerinin gerekli olduğu konumlardır. (2) ağ ve bağlantı maliyetleri ise ağ eniyileme probleminin genetik algoritma gerçekleştirimi (*implementation*) ile çözümü sonrasında elde edilenlerdir. Her nokta çifti arasında en az bir tane yol varsa, çözüm *bağlantılı* olarak değerlendirilir. Ağın bağlantılı olması gerektiğinden, bu işlem Dijkstra'nın Algoritması ile gerçekleştirilir. Rota eniyileme için başka bir genetik algoritma kullanılmıştır. Üretilen rota kümesindeki her rota ise bir düğüm dizilimi içerir.

Adolf et al. (2010), bir insansız hava aracının, yeni konumlandırılmış veya değişmiş engellere hızlı bir biçimde cevap verebilmesi amacıyla (çarpışmalardan kaçmak için), çevrimiçi ve hızlı bir yol planlama yaklaşımı sunmuşlardır. Çalışma, engel haritalama ve örnekleme tabanlı bir hareket planlama mimarisi temellidir. Çok-sorgulu ve çok-hedefli yol planlama için bütünleşik bir yaklaşım sunulmuştur. Sistem, öngörülemez engel değişikliklerinin söz konusu olduğu herhangi bir zamanda yol bulmada uygundur. Çok yakın veya engel içerisindeki geçiş noktaları, arama çizgesinde dikkate alınmamaktadır.

Kulgu (2007), görüntü işleme yardımıyla gezgin bir robotun ortamda bulunan engellere çarpmadan ilerlemesi, belirlenen hedefe doğru yol alması için gerekli rotanın çizilmesi ve gerekli kontrol komutlarını sağlamak amacıyla bir yazılım geliştirmiştir.

Hareketi denetlenen robotun engellere çarpmadan hedef konuma en kısa yolla gitmesi, *engellerden kaçma eniyileme problemi* olarak da adlandırılır. Arıcı

(2008), engellerin farklı yarıçaplı daireler şeklinde ve hareketsiz olduklarını, nesnenin ise noktasal boyutta olduğunu varsaymıştır. Birinci aşamada, her adımda, nesnenin mevcut konumu ile hedef konum arasındaki düz yol üzerindeki ilk engeli tek engel olarak düşünmüştür. Elde edilen ve en-uygun-olmayan yolun uzunluğu temel alınarak, en iyi yolun yer aldığı bölge bir elipsle sınırlandırılarak küçültülebilir. İkinci aşamada, engeller arasındaki en kısa mesafe dikkate alınarak bölge karelere bölünür. Arıcı (2008), engellerle kesişen karelere geçişleri yasaklayarak ayrıklaştırma yapmıştır. Bu yolla elde ettiği problemi (çizge kuramında en kısa yolun bulunması) ise Dijkstra'nın Algoritması ile çözmüştür. Rastgele engeller oluşturarak, farklı başlangıç konumlardan hedefe, önerdiği algoritmayı çalıştırmıştır. Kamera ile alınan görüntülerdeki dairesel kesitli engellerin konumlarını bulmuş, bulduğu yolu gezgin robot kullanarak izlemiştir.

Parlaktuna et al. (2007), bilinen-statik bir ortamda, gezgin robotlar için kesişmeyen rotalar oluşturacak VRP temelli bir yaklaşım önermişlerdir. Ağdaki her düğümü en az bir robot ile ziyaret söz konusudur ve robot kapasitesi dikkate alınır. Her robot, merkezî bir konumdan başlayıp rotasını tamamlar ve bu konuma geri döner. Önerilen yöntem üç algoritmadan oluşmaktadır: (1) süpürme algoritması, başlangıç konumuna göre her düğümün konumunu belirler; (2) tasarruf algoritması, robotun rotasına düğüm ekleme ile elde edilen tasarrufu hesaplar ve (3) herhangi bir düğümden bir diğerine en kısa uzaklığı hesaplamak için Dijkstra'nın en kısa yol algoritması kullanılır. Robot sayısının artmasıyla, çözüm zamanı azalır. Kullanılan sezgisel yöntem, dinamik ortamdaki tek robot durumuna uygulanmıştır. Çalışmada robotlar, birbirini engeller olarak dikkate alırlar ve neden olabilecekleri uzun seyahat mesafelerinden kaçınırlar.

Biswas (2014), bir başlangıç noktasından hedefe doğru hareket edecek ve bir sonraki noktayı belirleyecek, bir gezgin robot için çarpışma-serbest yolu bulmak amacıyla, basit-yeni bir yerel yol planlama algoritması geliştirmiştir. Bir sonraki nokta, sensöre en yakın engelin uzaklığını veren bir ultrasonik menzilli (*ultrasonic range*) sensörün çıkışı ile tespit edilir. Böylece, sensöre en yakın engellere olan mesafelerdeki ani değişimler belirlenir. Noktasal bir gezgin robot için pozisyonları bilinmeyen statik ve bilinmeyen engellerin olduğu durumda, başlangıç-hedef noktalar arasında gezinim söz konusudur. Çalışma uzayındaki

(statik ortamlardaki) engellerin konumu sensör ile tespit edilir. Sensörün normal mesafeden bir miktar açısal yayılım (*angular spread*) içerisinde engeli tespit etmesine bağlı olarak, engelden küçük bir mesafe uzaklıktaki ani nokta belirlenir. Gezgin robot ise ilgili noktaya doğru hareket ettiğinde, herhangi bir çarpışmadan (engellerden) kaçarak, engelden küçük mesafe ile (hedef noktaya doğru dönmeden önce) otomatik olarak uzaklaşır. Biswas (2014), PBASIC dilinde, gezgin robotun gerekli hareketlerini üretecek bir program geliştirmiştir.

Dolinskaya (2009), yön (*direction*), gezgin ajanın (*agent*) konumu ve zaman bağımlı bir ortamda en-uygun-yolu bulma problemlerini çalışmıştır. Çözümleme, belli bir hedef işleve sınırlandırılmamıştır. Daha genel amaç işlevi olarak, seyahat süresi, yakıt tüketimi vb.ni en aza indirme problemleri ele alınmıştır. Çalışma, benzer bir yolu bulmak için gerekli hesaplamasal zamanı azaltırken, daha-gerçekçi bir en-uygun-yolu bulma modeli (uygulamada gerçek-zamanlı gerçekleştirim gerekli) sunar. Ana hedeflerden biri, sistemin verilen başlangıç-hedef durumları için uygun bir yol (sadece en keskin dönüş ayrıtlarını ve düz doğru parçalarını içerir) oluşturması amacıyla, hızlı ve hesaplamasal olarak verimli bir yol bulma algoritması üretmektir.

Dolinskaya (2009), geliştirdiği programda, algoritmayı ve başarılı bir biçimde bulunan en-uygun-yolları test etmiştir. Ona göre, eğrilik/kavislenme (*curvature*) kısıtı ile yol bulma, robotbilim ve insansız hava aracı rotalama alanlarında yoğun bir biçimde çalışılmaktadır. Bu çalışması ise genelleştirilmiş yön-bağımlı bir ortamda en-uygun-yolu analitik olarak ortaya koymada ilkidir. Dinamik programlama yol bulma modeli, sınırlı görüş mesafesini (*visibility horizon*) bütünleştirir. Sistem dinamiklerini eniyileme sürecine dâhil ederek, düzgün (*smooth*) ve kontrolü-mümkün (*control-feasible*) en hızlı yolu bulur.

Polishchuk (2007), çokgensel alanlarda (*polygonal domains*) en kısa *non-crossing thick paths* (kesişmeyen kalınlıktaki yollar) bulma problemini çalışmıştır. Bir rotalama problemi olarak, rotalanabilen maksimum *thick paths* sayısını bulma ele alınmaktadır. Basit çokgenler içeren problem için polinom-zamanlı algoritmalar sunulmuş, delikler içeren çokgensel alanlar için problemin NP-zor olduğu gösterilmiştir. Verilen basit bir n -köşeli çokgenin (n -gon) sınırları

üzerindeki uç/bağlantı noktası (*terminal*) çiftleri kümesi kullanılarak, bu çiftleri bağlayan en kısa *non-crossing thick paths*¹ kümesine ilişkin gösterim hesaplanır. Çalışmada ayrıca, hareket planlama problemi de dikkate alınmıştır: (1) tur (*touring*) problemleri, (2) düz-çizgili ortamlarda (*rectilinear domains*) sınırlı sayıda bağlantılı en kısa yollar ve (3) pikselleştirilmiş ortamlarda en uygun turlar.

Polishchuk (2007), minimum-maliyetli bir akışın (*minimum-cost flow* - geometrik ortamlarda çalışılmıştır) bir dizi (*thick*) yola ayrıştırılabilmesine dayanarak (*continuous flow decomposition theorem*), minimum-maliyetli sürekli akış problemi için ilk algoritmaya-dayalı (*algorithmic*) sonuçları elde etmek amacıyla, algoritmaları *thick paths* bulmada uygulamıştır.

Morin (2010), arayıcının (*searcher*) görünürlük kısıtlarını dâhil edecek yeni bir *detection search* (belirsiz bir konumdaki aranan nesneyi bulma) problemini, hem arama teorisi (*search theory*) tekniklerini hem de yol planlama kavramlarını (bölgeler-arası (*inter-region*) görünürlük: nesnenin konumu ve tespit edilebilirlik ile ilgili belirsizlik) kullanarak formülleştirmiştir. Çalışmasında, iki farklı durum için çözüm yöntemleri geliştirmiştir: (1) tek-ölçütlü durumda, arama planının (*search plan*) verimliliği, arama nesnesini bulma olasılığına karşılık gelir. (2) çok-ölçütlü durum² ise arayıcının güvenliğini ve planın karmaşıklığını ortaya koyar.

Morin (2010), tek ve çok ölçütlü *optimal searcher* yol problemi örneklerini çözmek için bir karınca kolonisi eniyilemesi ve iki çok-ölçütlü türevini geliştirmiştir. Çalışmanın belirgin hedefleri şunlardır: (1) arazi görünürlüğünü (*terrain visibility*) ve yol kısıtlarını hesaba katan verimli bir arama planını elde etmek için matematiksel bir yöntem önermek (ona göre, böylece problem, yol planlamanın gerçekliğine daha yakın olacaktır), (2) ilk yöntemi çok-ölçütlü bir

¹ Polishchuk'a (2007) göre, *non-crossing thick paths* problemleri, sürekli akış (*continuous flow*) problemleri gibi, akış-kısıtlı alanlarda (*flow-constrained areas*), hava durumu tehlikeleri, uçuşa-kapalı bölgeler ve diğer kısıtlardan kaçınarak, trafik şeritlerinin en-uygun-şekilde rotalanmasını içeren hava trafiği yönetimi (*air traffic management*) probleminde ortaya çıkar.

² Morin'e (2010) göre, her ek ölçüt, problemin karmaşıklığını artırırken daha-gerçekçi bir modele katkıda bulunur. Morin (2010), yörüngelerin ek kısıtlar ve karakteristiklere sahip yollar olmasına bağlı olarak, yol planlama çalışmasının yörünge/gezinge planlamaya (*trajectory planning*) genişletilebileceğini ummuştur.

yaklaşım kullanarak iyileştirmek ve (3) bir arama için en uygun veya en-uygun-yakın arama planlarını hesaplayacak algoritmaları önermek. Çok-ölçütlü yol problemleri bilinen hedef noktalara uygulanırken, bu çalışma ise birden fazla amaç işlevini içeren *optimal searcher* yol probleminin görünürlük-ölçütlü (*with visibility*) olan yeni bir türevini (genelleştirme) çözecek ilk çalışmadır.

4.4 Noktadan Noktaya En Kısa Yolu Bulma Çalışmaları

En kısa yolun bulunması, farklı uygulamalarıyla ve pek çok amaçla karşılaşılan bir işlemdir:

- Askerî görev planlama (*military mission planning*)
- Baskılı devre kartlarının ve tümleşik devrelerin tasarımı
- Bölgesel planlama (*regional planning*)
- Coğrafi bilgi sistemleri (*geographic information systems*)
- Kablo rotalama (*wire routing*)
- Kaynaklama (*welding seams*) ve delik delme (*drilling holes*) işlemleri
- Nakliye-dağıtım ile ilgili problemler
- Oyun geliştirme (*game development*)
- Robotbilim (endüstriyel üretim ve ilgili uygulamaları)

Gezgin robot teknolojileri araştırmalarından biri olarak gezgin robot gezinimi (*mobile robot navigation*), (1) yol planlama ve (2) hareket planlama olarak iki temel-alt probleme ayrılır. Yan et al. (2008a), bir başlangıç noktasından bir hedef noktasına en-uygun-güzergâhı bulmak amacıyla, üçgen-tabanlı bir yol planlama yaklaşımı önermişlerdir. Çalışmada, delikler içeren bir çokgenle ifade edilen engeller içeren iki-boyutlu ve sonlu bir ortam dikkate alınmıştır. Bir robotun yol ve hareket planlamaları melez bir sistemde bütünleştirilmiştir.

Yan et al. (2008a), rastgele bir çokgensel ortamda, belirlenen başlangıç konumundan hedef konuma bir robotun güvenli ve verimli bir biçimde sürülebilmesi problemini ele almışlardır. Robotun durum uzayı üçgenleştirilir (*triangulation*), A* algoritması kullanılarak bir çizge oluşturulur ve çizge üzerinde artımlı bir sezgisel arama algoritması işletilir. Dinamik ortamda ardışık üçgenlerin

en uygun dizilimi bulunur ve dizilim boyunca robotun öteleme (*translational*) ve döndürme (*rotational*) hızları otomatik olarak üretilir. Çizge, ilgili üçgenlerin geometrik şekilleri ve mevcut robot pozisyonu ile hedef nokta arasındaki göreceli pozisyon temellidir. Yol, kısa ve düzgün olacak şekilde belirlenir.

Yan et al. (2008b), en uygun rotaları bulmada bir yol planlama algoritması önermişlerdir. Bu algoritma, A* arama algoritmasıyla, gerçek-zamanda üretilen ikili çizge (*dual graph*) üzerinde en-uygun-güzergâhı bulur. Başlangıçtan hedefe en-uygun-yolu bulmada, güvenlik ve tamlık özellikleriyle, üçgen-tabanlı bir yol planlama yaklaşımı önerilmiştir. Ortam, delikler içeren çokgenlerle ifade edilen engeller içermekte olup, iki-boyutlu ve sonludur. Planlanan en-uygun-yol, başlangıç-hedef noktalar arasındaki herhangi bir engelle kesişmeyen (boş alanda yer alan) bir dizi üçgen üzerinde konumlandırılır. Ayrıca gerekli olduğu durumda, engellerden güvenli mesafede tutulabilir. En-uygun-maliyet için çizgenin kenarlarına ait maliyetler söz konusudur. Algoritmanın hesaplamasal maliyetini azaltmak için yol aranırken aynı zamanda da çizge oluşturulmaktadır.

Khar and Hall (2004), VRP'ye benzer şekilde, robotun alacağı en-uygun-yolu araştırmışlardır. Çalışmada, bir robot için bir başlangıç noktasından bir dizi hedefe (ziyaret edilmesi gereken belli geçiş noktaları) seyahat söz konusudur. Sadece hedeflerin koordinatlarını gösteren bir harita verilip, robotun mevcut engelleri tespit ederek kaçması beklenir. Robot geziniminde düğümler arasındaki mesafeler ise VRP'de ayrıtlar üzerindeki maliyetlere karşılık gelmektedir.

Shafie (2011), sezgisel yöntemlerden yararlanarak ortamı keşfedecek çoklu robotların kullanımıyla, gezinim problemine bir çözüm önermiştir. Çalışmada, çoklu TSP zaman pencereli alt problemlere ayrılır. Temel problem GA, gezgin satıcı problemleri ise bağımsız olarak sezgisel bir algoritma ile çözülür.

Küçükceylan (2007), gezgin robotlar için özel amaç olarak, engel içeren bir alanda hedefe ulaşma probleminin çözülmesini amaçlamıştır. Söz konusu alan, sınırlı bir alandaki siyah renkli engeller ve beyaz renkli geçilebilir yollardan oluşan, her türlü birleşimdeki labirent sistemi olarak ele alınır. Çalışmada,

belirtilen giriş-çıkış noktaları arasında bağlantısı olan, labirent içindeki tüm yolların bulunması ve en geçilebilir/kısa olanının seçilip izlenmesi söz konusudur.

Mueggler et al. (2014), bir hava robotu ve bir kara robotunun tam otomatik işbirlikçiliğiyle, model bir felaket senaryosunda arama-kurtarma çalışmasını incelemişlerdir. Hava aracı, ilk olarak ilgili alanı haritalar ve kara aracı için felaket mağdurlarına ilk yardım çantasını ulaştıracak en hızlı görevi hesaplar. Söz konusu görev planlama algoritması, sabit ve hareket eden engelleri dikkate alır. İnsan etkileşimi olmadan ve robotlar arasında en az iletişimle tüm görev gerçekleştirilir. Çalışmada, hayat kurtarma ile ilgili görevlerde zamanın en kritik etken olmasına bağlı olarak, heterojen robot ekibin felakete en hızlı yanıtı verebilmesi için hava ve kara robotlarının ilgili yerlere konuşlandırılması önerilmiştir. Haritalama ve izleme yetenekleriyle, kuş-bakışı görüşle engelleri tespit eden hava robotu, ilgili bilgiyi kara robotuna gönderir. Hava robotu, bireye olan hesaplanmış yol boyunca, yüksek taşıma kapasitesine sahip olan (yük alabilen) kara robotuna kılavuzluk eder.

Mueggler et al. (2014), daha esnek ve daha pratik bir sistem için iki robot kullanmışlardır. Çalışmada, insanların girmesinin çok tehlikeli olduğu alanlara robotların gönderilmesi söz konusudur. Ayrıca, engeller kaldırılıp başka bir konuma bırakılabilmektedir. Engellerin ve hedefin konumlarına ait bilgi bilinmemektedir ve sabit engellerden kaçacak şekilde bir yol belirlenmelidir. Maliyet görev için işletim süresidir ve planlama A* algoritması temellidir. Harita üzerindeki güzergâhlar ise Dijkstra'nın Algoritması ile aranır. Robotlar arasındaki yinelenmeli süreç sayesinde ise gecikmeler önlenir.

Rao (1995), bir düzlemdeki (*plane*) bir dizi çokgensel engelden kaçacak şekilde, noktasal bir robotun kaynak noktadan hedef noktaya yolunun planlanması problemini ele almıştır. Arazinin sıradüzensel olarak üçgenleştirilmesine (üçgenlere bölme) dayanan bir yol planlama önermiştir. Engeller, sıradüzenin en düşük seviyesinde tam ayrıntı ile ifade edilirler ve daha büyük olanları daha yüksek seviyelerde oluşturmak için birleştirilirler. Bir yol, yüksek seviyede, olası değil veya kabul edilemez uzunluktaysa, daha düşük seviyedeki diğer yollar dikkate alınır. Her üçgenin ağırlık merkezine ilişkin çizge düğümleri olacak

şekilde ve üçgenleştirme temel alınarak bir *ikili çizge* tanımlanır. İki düğüm, engel olmayan sadece bir üçgen kenarını paylaşıyorlarsa çizge kenarı ile bağlıdır. “s-d” arasındaki yolu planlamak amacıyla, s ve d düğümlerini içeren üçgenlere ilişkin düğümler arasındaki *ikili çizge* üzerinde bir yol hesaplanır.

Belkhouche and Belkhouche (2007), gezgin robot gezinimi için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yaklaşım, robotun hareket ile ilgili denklemlerini (*kinematics equations*) ve geometrik kuralları bütünleştirmektedir. Basit olan ve sadece hedefin pozisyonunu gerektiren kontrol stratejisine göre, robotun açısız hızı, robotu ve hedefi birleştiren görüş açısı hattının dönüş oranı ile orantılıdır. Kutupsal koordinatlardaki (*polar coordinates*) robotun yolu, kontrol değişkenlerinin bir işlevi olarak sağlanır. Farklı kontrol değişkenleri için farklı güzergâhlar elde edilir. Engellerden kaçmak için hem çevrimiçi hem de çevrimdışı stratejiler kullanılmışlardır. Onlara göre, robot-hedef görüş hattında görünen engellerden, kontrol değişkenlerinin ayarlanmasıyla kolaylıkla kaçılabilir.

Lumelsky and Stepanov (1987), rasgele şekillerde ve boyutlardaki bilinmeyen engellerle dolu iki-boyutlu bir sahnede hareket eden noktasal bir robot/otomat (*automaton*) için yol planlama problemini ele almışlardır. Çalışmada, boyut ve şekil bilgisi kolaylıkla göz ardı edilmektedir ve bilgi tam değildir. Mevcut bilgi, otomata ait mevcut konum ve hedef konum ile sınırlıdır ve otomat engele çarptığında, otomatın dokunmatik algılayıcısı ile tespit edilir. Çalışmada, labirent duvarlarının (*barriers*) sıfırdan farklı kalınlıklara sahip olduğu varsayılarak, labirent ile ilgili tam bilginin gereksiz olduğu ve labirent arama (*maze search*) problemini çözmede yerel bilginin yeterli olduğu gösterilmiştir.

4.5 Diğer Çalışmalar

Robotbilimdeki anahtar noktalardan biri, robotlara ait bir dizi hareketin en-uygun-şekilde gerçekleştirilmesidir. Ayrıca, bütünsel verimlilik, güvenilirlik, süreklilik ve yüksek nitelikte çalışma beklenir. Pek çok endüstriyel senaryoda, benzer hareketlerin eniyilemesi, otomatik olarak yapılmamaktadır ve bu nedenle maliyetli ve hata-eğilimlidir. Dolayısıyla araştırmacılar, en-uygun-yörüngeleri otomatik olarak hesaplayacak algoritmalar üzerinde son birkaç yıldır

çalışmaktadırlar (Alatartsev et al., 2015). Problem, hareket ile ilgili gereksiz durumlar, çarpışmalardan kaçma, belirsiz görev başarımı olasılıkları gibi ek etkenlere bağlı olarak karmaşıklaşır. Alatartsev et al. (2015), robotbilim kapsamındaki görevlerin eniyilemesi ile ilgili yaklaşımları özetlemişler ve sınıflandırmışlar ve mevcut kombinasyonel problemlere genel bakış sunmuşlardır.

Moura et al. (2010), otonom sualtı araçlarının kullanımını ve rota planlama problemini çalışmışlardır. Temel hedefler, (1) araçlar arasındaki çarpışmalar önlenirken, toplam seyahat mesafesinin en aza indirilmesi (VRP olarak formülleştirme) ve (2) örnek sayısının en çoğa çıkarılmasıdır.

Sualtı araçları için engel içeren ortamlarda en-uygun-yolların bulunması (Aghababa, 2012), karmaşık ortamlarda (statik/hareketli engeller içerebilir) etkili bir biçimde gezinim ve yönlendirme (engellere çarpmadan), yol planlama ve engellerden kaçma stratejilerini içerir. Sualtı aracı engeller üzerinden hareket etmezse, seyahat rotası çok uzun olacaktır. Sualtı ortamının bilindiği varsayılırsa, yol planlamanın ana fikri, aracı engellerden uzak tutmak ve bazı eniyileme ölçütlerine göre kaynak noktadan hedef noktaya çarpışma-serbest yolu bulmaktır.

Hesaplamalı geometri alanındaki eniyileme problemlerinden bekçi/gözcü rotası (*watchman route*) probleminde, basit bir çokgen içerisindeki herhangi bir nokta, rota üzerindeki en az bir noktadan görünür olacak şekilde, tümüyle çokgen içerisinde yer alan en kısa rota hesaplanır. Çok-hedefli yol planlama (*multi-goal path planning*) probleminde ise bir robot çalışma ortamında bulunan bir dizi hedefi bağlayan en kısa yol bulunur (Faigl et al., 2011).

Burke and Kendall (1999), bir dizi şeklin daha büyük bir şekil üzerine yerleştirildiği *nesting* problemini ele almışlardır. İki çokgen birbirine temas edebilir; fakat şekiller, örtüşmemeli ve büyük olan şekil tarafından sınırlandırılmalıdırlar. Çokgenlerin birbirine daha yakın olması veya daha dar/sıkı bir şekilde bir arada olmaları söz konusu olmayacak şekilde, büyük şekilde kullanılan alanın en aza indirilmesi amaçlanır. Sadece dışbükey çokgenlerin dikkate alındığı problemde, $P1$ ve $P2$ çokgenleri için alternatif pozisyonlarda, en küçük alana sahip dışbükey kabuğun olduğu durum sonuç yerleşimdir. Burke and

Kendall (1999), gerçekleştirim için karınca algoritmasından yararlanmışlardır. Ayrıca sonuçları, aynı problem için uygulanmış diğerk evrimsel ve meta-sezgisel algoritmalarla karşılaştırmışlardır.

Roque and Doering (2005), bir yol planlama sistemi geliştirmışlerdir. Bu amaçla, çalışma uzayından yakalanan engel görüntülerinden çıkarılan geometrik yapıdan elde edilen yol haritasının üretilmesini temel almışlardır. Engelleri, potansiyel delikler içeren dairesel şekiller ve genelleştirilmış çokgenler olarak varsaymışlardır.

Mirolo and Pagello (2003), okgensel bir ortamda dışbükey bir çokgenin serbest dönüşümlerini (*free translations*) planlayacak yeni bir alt-hücrelere-bölme (*cell-subdivision*) yaklaşımının potansiyelini incelemişlerdir. Çalışma uzayının ince-taneli (*fine-grained*) tanımı temel alınarak, basit hareketlerin (*simple motions*) planlanması üzerinde odaklanılmıştır. Serbest bir yol iki ana aşamada planlanır: (1) boş alan üzerinde ilgili topolojik bilgiyi tutan bir *cell-subdivision* yapısını inşa etmek amaçıyla, bir düzlem-süpürme (*plane-sweep*) rneği (*paradigm*) ve yapılandırma uzayındaki engellerin sınırlarını yaklaşık-olarak içeren çokgensel zincirler kümesi düzenlenir. (2) ikinci aşamadaki hesaplamalar ise hücresel bölümleri aramak için tasarlanmış bir A* şeması ile yapılır. Arama süresince, sınırlayıcı zincirler daha fazla iyileştirme için söz konusudur. Engeller, dışbükey bileşenlere ayrıştırılmış olarak ifade edilmişlerdir. Ayrıca, algoritma ile işlenen gereksiz bilginin oranını değerlendirmek amaçıyla, algoritmaya ve insan sezgilerine dayalı yol planlama arasında bir karşılaştırma ele alınmıştır.

4.6 Tez alışmasının Literatürdeki Diğerk alışmalardan Farkı

Bu alt bölümde, tez çalışması, ele alınan problemle ilişkili olan ve bu probleme benzer TSP ve VRP türü problemleri içeren çalışmalarla karşılaştırılmış; bu çalışmanın literatüre katkısı açık bir biçimde ortaya konmuştur.

Tez çalışmasına ilişkin karşılaştırma, izelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Tez çalışmasının literatürdeki benzer ve yakın çalışmalarla karşılaştırılması.

ÖLÇÜT ÇALIŞMA	Kapasite Sınırlı Olma	Çözüm Yöntemi	Meta-Sezgisel Algoritma Kullanımı	Deneyisel Çalışma	VRPLIB Kullanımı
Parlaktuna et al. (2007)	Gezgin robotlar için kesişmeyen rotalar	Süpürme ve tasarruf algoritmaları + Dijkstra	Yok	Tek robot durumuna uygulama: robotlar, birbirini engel olarak dikkate alırlar.	Yok
Xidias and Azariadis (2011)	Araç rotalama ve planlama + hareket planlama	Ortamin geometrisi dikkate alınır.	GA	Farklı depo, engel, iş istasyonu ve araç sayıları ile testler yapılması	Yok
Thakur et al. (2013)	Engellerden kaçarak, ara noktalar üzerinden güzergâh planlama	A* arama	Yok	Ortam karesel çerçevelere (<i>grids</i>) bölünmüş; ortamda engel olmadan ve belli engel yoğunluğu (<i>obstacle density</i>) olacak şekilde, değişen robot ve geçiş noktası sayıları ile testler yapılmıştır.	Yok
Tez Çalışması (2016)	CVRP	Görünürlük çizgesi + Dijkstra	GA + 2-opt	Dairesel ve çokgensel engeller için müşteri, engel sayıları ve engel büyüklüğü değişimi	Var

Engel içeren ortamlarda, yol planlama problemi, noktadan noktaya en kısa yolu bulma ve TSP için literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu tezde çalışılan problem ise kapasite sınırlı VRP'nin engel içeren ortamlara uyarlanmasına yönelik olup, bu problemin literatürde tam karşılığı bulunmamaktadır.

5. ENGEL İÇEREN ORTAMLARDA KAPASİTELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ VE GENEL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında ele alınan probleme ilişkin tüm ayrıntılar verilmiş ve bu problemin çözümü için önerilen yöntem anlatılmıştır.

Rotalama tek araçla yapılabilir. Bu nedenle, ilk olarak TSP çözümü için bir program geliştirilmiştir. Çözüm için geliştirilen GA tabanlı melez meta-sezgisel algoritma, literatürdeki bazı TSP örnekleri üzerinde test edilmiştir. Daha sonra, kromozom gösterimi, çaprazlama işleci, 2-opt algoritması ve diğer kısımlar, *sadece kapasite sınırı* olacak şekilde, VRP çözümü için uyarlanmış ve algoritma, literatürdeki bazı CVRP örnekleri üzerinde test edilmiştir. Son olarak, CVRP çözümü, engel içeren ortamlar için genişletilmiş ve test edilmiştir. İlk olarak ek kılavuz noktaları, daha sonra engellere ait köşe noktaları temel alınmıştır. Bu sürece ilişkin gerçekleştirim adımları ise ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

5.1 Problemin Tanımı

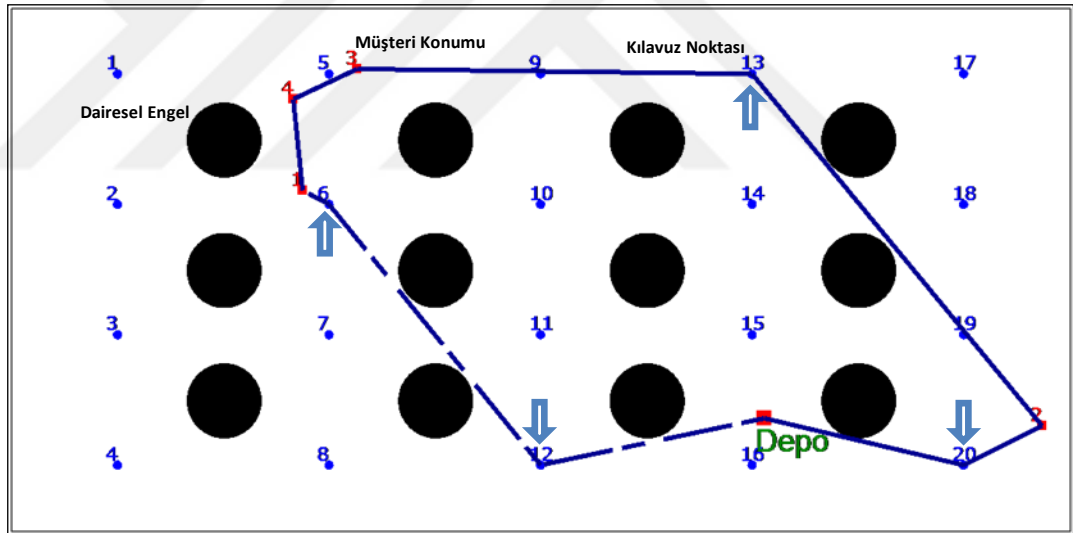
Engel içeren ortamlarda CVRP’de, her araç, depoda başlayan ve sonlanan güzergâhı üzerindeki ziyaret edilecek tüm nokta çiftleri arasında, ortamdaki tüm engelleri dikkate alarak ve en kısa mesafe ile hareket etmelidir. Minimum-maliyetli rota kümesini belirlemede, araçların engellere yakın (engellere belli uzaklıklardaki kılavuz noktaları veya engellere ait köşe noktaları üzerinden) hareket etmemeleri, uzun seyahat mesafelerine neden olabilmektedir.

Ortaman bilindiği, iki-boyutlu¹, sınırlı, statik ve sürekli (*continuous*) olduğu, engellerin (daire veya dışbükey çokgen olarak tanımlı) hareketsiz oldukları, depo-müşteri-kılavuz konumlarının noktasal boyutta (x - y koordinatları ile) oldukları ve her nokta çifti arasındaki uzaklıkların önceden belli olmadığı, ama hesaplanabildiği, araçların ise eğrisel olarak hareket edemedikleri ve düz bir

¹ Üç-boyutlu ortamların çoğu, iki-boyutlu ortamlara dönüştürülebilmektedir. Ayrıca iki-boyutlu ortamlar, özellikle yol planlamada, daha çok uygulama imkânına sahiptirler.

biçimde gidebildikleri varsayılır. Araçlar, engeller arasından geçebilmeleri için noktasal olarak tanımlanırlar ve engeller dışındaki alanlarda (sürekli arazi) hareket edebilmektedirler. Engeller ise aralarında belli uzaklıklar olacak şekilde ortamda yer alırlar. Geliştirilen algoritma işletilerek, her rota, ilgili depo-müşteri-kılavuz konumlarını içerecek ve herhangi bir engelle kesişmeyecek şekilde, en uygun rota kümesi belirlenir ve konumlar arasındaki dolaşmalar görselleştirilir.

Ortamın engel içermesi, engel içermeyen durumda müşterilere ulaşılması için gerekli toplam rotalama maliyetini artırmakta ve rotalama maliyetini azaltma, bu problem için daha önemli bir hedef olmaktadır. Şekil 5.1’de, bu yeni problemi göstermek amacıyla, çözümüyle birlikte örnek bir gösterim verilmiştir. Bu gösterimde, daire şeklindeki “12 (3×4) engel”¹ ortama düzenli aralıklarla dağıtılmıştır. Ortamda, rasgele bir depo ve dört müşteri konumu ve 20 (4×5) düzenli kılavuz konumu mevcuttur. Çözüm ise tek rota için üretilmiştir.



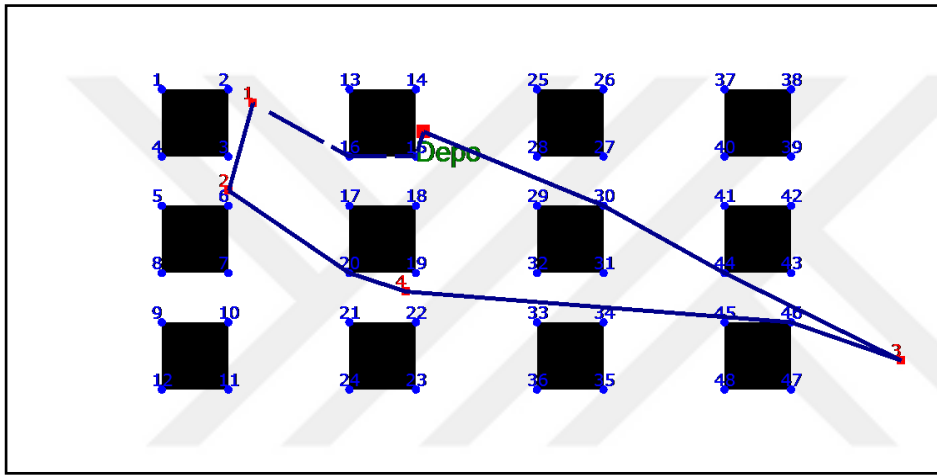
Şekil 5.1: Engel içeren bir ortamda, kılavuz noktaları ile belirlenen en kısa yol.

Şekil 5.1’de, depo, müşteri ve kılavuz konumları, sırasıyla, büyük bir kare, küçük kareler ve küçük daireler (ve ilgili sıra numaraları) ile gösterilmektedirler. Sadece aynı satır/sütun üzerinde bulunan kılavuz çiftleri, aralarındaki hat herhangi

¹ “ $a \times b$ ”, a satır ve b sütun olacak şekilde (matris şeklinde), toplam “ $a \times b$ ” adet engeli veya kılavuz/köşe noktasını ifade etmek için kullanılır.

bir engelle kesişmediği için birbirini görebilmektedirler. Şekil 5.1’de oklarla gösterilen geçiş noktaları, ilgili nokta çifti arasındaki potansiyel hat üzerinde herhangi bir engel mevcut olduğu durumda ziyaret edilecek kılavuz noktalarıdır.

Şekil 5.2’de, bu yeni problemi göstermek amacıyla, çözümüyle birlikte örnek bir gösterim daha verilmiştir. Bu gösterimde ise kare şeklindeki (dışbükey çokgen türü olarak) 12 (3×4) engel ortama düzenli aralıklarla dağıtılmıştır. Ortamda, rasgele bir depo ve dört müşteri konumu ve 48 (12×4) engel köşesi mevcuttur. Çözüm ise tek rota için üretilmiştir.



Şekil 5.2: Engel içeren bir ortamda, köşe noktaları ile belirlenen en kısa yol.

Konumlar arasındaki dolaşmalarda, ardışık herhangi iki nokta arasındaki potansiyel hat üzerinde herhangi bir engel tespit edilirse, yeni ve geçilebilir bir yol belirlenir. Mevcut-hedef konumlar arasında hareket edilebilmesi amacıyla, (1) dairesel engeller için ortamda belli düzende yer alan kılavuz noktaları ve (2) çokgensel engeller için ortamdaki engellere ait köşe noktaları ziyaret edilir. Belirlenen rotalarda, ardışık herhangi iki nokta arasındaki doğru parçası, herhangi bir engelin herhangi bir kenarı (ardışık iki köşesi arasındaki hat) olabilir.

5.2 Araç Rotalama Probleminin Dairesel ve Çokgensel Engeller İçeren Ortamlara Uyarlanması

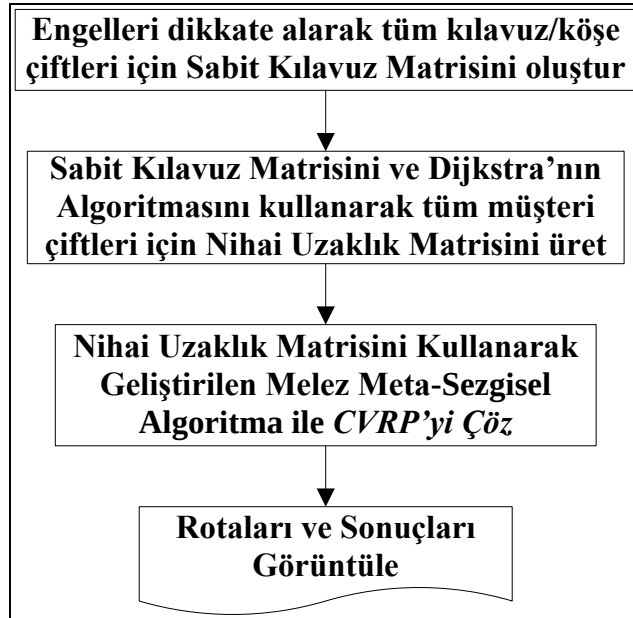
Bu alt bölümde, VRP’nin engel içeren ortamlara uyarlanmasına ilişkin bilgiler verilmiştir. İlk olarak, önerilen yönteme ait akış şemaları gösterilmiştir;

daha sonra, uzaklık matrislerinin oluşturulmasından bahsedilmiştir. Çözüm yöntemi ise bir sonraki alt bölümde (Bölüm 5.3) açıklanmıştır.

Tez çalışması kapsamında, engel içeren ortamlarda CVRP çözümü için iki farklı yöntem geliştirilmiştir: engeller, (1) ilk yöntemde daireler olarak, (2) ikinci yöntemde ise dışbükey çokgenler olarak tanımlanırlar. İlk yöntem, özellikle ve sadece, potansiyel kılavuz içeren alanlarda hareket edilebilen fabrika gibi ortamlar için geliştirilmiştir. Bu yöntem ayrıca, çokgensel engeller içeren ortamlar için geliştirilen çözüme de temel oluşturmaktadır. Aynı zamanda bir daire, çok sayıda kenardan oluşan bir çokgen olarak düşünülebilir. Dairelerin ve çokgenlerin bir doğru ile kesişme durumları ise farklıdır.

5.2.1 Probleme ilişkin genel çözüm yöntemi

Herhangi bir nokta çifti arasındaki uzaklık hesaplanırken, kesişme durumları dikkate alınmaktadır. Tüm nokta çiftleri arasındaki uzaklıklar hesaplandıktan sonra, GA ve yerel arama tabanlı melez meta-sezgisel algoritma CVRP çözümü için uygulanır. Bu yöntemin akış şeması Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3: Engel içeren ortamlarda CVRP çözümüne ilişkin yöntemin akış şeması.

Tüm müşteri çiftleri arasındaki uzaklık değerlerini içeren nihai uzaklık

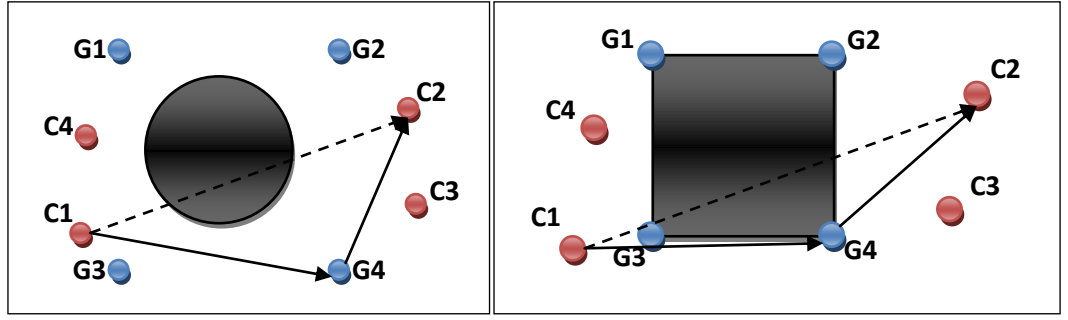
matrisi, iki adımda üretilir: (1) tüm kılavuz/köşe çiftleri arasındaki uzaklıkların hesaplanıp, sabit kılavuz matrisinin oluşturulması ve (2) bu matris kullanılarak, doğrudan birbirini görmeyen her müşteri çifti için bu konumlar arasındaki yolun ve toplam mesafenin belirlenerek, ara uzaklık matrisinin oluşturulması.

5.2.2 Müşteri çiftleri için ara uzaklık matrislerinin oluşturulması

CVRP çözümü, geliştirilen yöntemde, iki farklı türdeki engelleri içeren ortamlar için ele alınmıştır: (1) dairesel engeller içeren ve (2) dışbükey çokgensel engeller içeren ortamlar. Uzaklık matrisleri oluşturulurken, ortama düzenli olarak yerleştirilen veya kullanıcı tarafından belirlenen ek kılavuz noktalarının ortamda olup olmamasına göre, hesaplamalarda farklılıklar olmaktadır.

Dairesel engeller içeren ortamlarda (Şekil 5.4(a)), bu ortam türü için tanımlanan kılavuz noktaları kullanılarak, birbirini doğrudan görmeyen iki müşteri arasındaki yol güzergâhı belirlenir ve araçların engellere fazla yaklaşmadan dolaşmaları sağlanır. Bu çözüm, gerçek hayattaki engeller kendilerini içine alan daireler şeklinde kolaylıkla modellenebileceğinden, her ortam türü için genel bir çözüm yöntemi oluşturmak amacıyla tercih edilmiştir. Böylece herhangi bir engel, bir merkez noktası ve yarıçap verilerek, kendisini içine alan bir daire ile ifade edilebilmektedir. Geliştirilen benzetim ortamında, kılavuz noktaları, kullanıcı tarafından araç geçişine uygun konumlara istenildiği kadar eklenebilmektedir. Bu çözüm, örneğin fabrikalarda, tanımlanacak hareket noktaları aracılığıyla, kat içerisinde uygun yollar geliştirilebilmesini sağlayabilmeye yöneliktir.

Şekil 5.4(a)'da, *bir* engel ve *dört* kılavuz noktası içeren örnek bir ortam verilmiştir. *C1-C2* müşteri çifti arasındaki hat üzerinde engel olduğu (müşteri çiftinin birbirini doğrudan görememesi, kesikli çizgi ile gösterilmiştir) için bu konumlar arasındaki harekette Öklid uzaklığından daha maliyetli bir yol izlenmesi gerektiği görülmektedir. Örnekte, bu müşteri çiftine ait konumlar *görünür* olmadıkları için bu iki nokta arasında engelle kesişmeden *doğrudan hareket edilebilmesi* mümkün değildir. *C1-C2* konumları arasındaki ulaşım ise *G4* kılavuz noktası aracılığıyla yapılabilmektedir. Kılavuz noktaları yaklaşımı, engel etrafında dairesel hareket her araç türü için uygun olamayabileceğinden ele alınmıştır.



Şekil 5.4: Engel içeren bir ortamda, $C1$ - $C2$ müşteri çifti arasındaki en kısa yol: (a) dairesel ve (b) çokgensel birer engel için.

Çokgensel engeller içeren ortamlarda (Şekil 5.4(b)) ise araçlar, müşteri çifti arasındaki en uygun rotayı kullanabilmekte ve gerektiğinde engellerin köşeleri üzerinden veya kenarları boyunca ilerleyebilmektedirler. Bu nedenle bu yaklaşımda, mevcut engellere ait köşe konumları kılavuz noktaları olarak ele alınır ve ortama ek kılavuz noktaları eklenmez. Şekil 5.4(b)'de, bir engel ve dört köşe noktası içeren örnek bir ortamdaki $C1$ - $C2$ müşteri çifti için karenin sağ alt köşesinden ($G4$ köşe noktası) geçen en kısa yol bulunmuş ve gösterilmiştir.

Herhangi bir kılavuz çifti, müşteri çifti veya bir kılavuz noktası ve bir depo-müşteri konumu arasındaki uzaklık değerini hesaplamak için geliştirilen algoritmanın sözde kodu (*pseudo-code*) Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Engeller içeren ortamda iki nokta arasındaki uzaklığı hesaplayan sözde kod.

```

Algorithm: calculateDistanceValueBetweenNodePair(PointF point1, PointF point2)
1.  if "point1-point2 nokta çifti arasındaki potansiyel hat herhangi bir engelin içinden geçiyor" then
2.      uzaklık değeri  $\leftarrow \infty$ 
3.  else
4.      uzaklık değeri  $\leftarrow$  nokta çifti arasındaki Öklid karesel uzaklığı (Euclidean squared distance)
5.  end if

```

Çizelge 5.1'de, kesişme durumları kesişme algoritması ile belirlenir. *Birinci* adımda *tek noktada* kesişme olduğu durumda, ilgili nokta, engel dairesel ise çembere ait teğet noktası, çokgensel ise çokgene ait köşe noktasıdır.

Şekil 5.4'teki örnekler için kılavuz noktaları arasındaki uzaklıklar bir kez hesaplanır ve kılavuz noktası sayısı *dört* olduğundan, bu uzaklıkları içeren " $4 \times$

4''lük sabit kılavuz matrisi sadece bir kez oluşturulur. Birbirini doğrudan görmeyen herhangi bir müşteri çifti arasındaki uzaklık hesaplanırken, sabit kılavuz matrisine *iki* satır ve *iki* sütun eklenir. Daha sonra, bu noktaların birbiri arasındaki uzaklığı ve bu noktalar ile *dört* kılavuz konumu arasındaki uzaklıkları da içeren “6 × 6”lık ara uzaklık matrisi üretilir ve *görünürlük çizgesi* oluşturulmuş olur. C1-C2 müşteri çifti için oluşturulan matris Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2: C1-C2 müşteri çifti için oluşturulan ara uzaklık matrisi.

Konumlar	G1	G2	G3	G4	C1	C2
G1	0	c_{G1G2}	c_{G1G3}	c_{G1G4}	c_{G1C1}	c_{G1C2}
G2	c_{G2G1}	0	c_{G2G3}	c_{G2G4}	c_{G2C1}	c_{G2C2}
G3	c_{G3G1}	c_{G3G2}	0	c_{G3G4}	c_{G3C1}	c_{G3C2}
G4	c_{G4G1}	c_{G4G2}	c_{G4G3}	0	c_{G4C1}	c_{G4C2}
C1	c_{C1G1}	c_{C1G2}	c_{C1G3}	c_{C1G4}	0	c_{C1C2}
C2	c_{C2G1}	c_{C2G2}	c_{C2G3}	c_{C2G4}	c_{C2C1}	0

Çizelge 5.2’de, G_i “i.” kılavuz konumuna (s), C_i ise “i.” müşteri konumuna (d) karşılık gelmektedir; c_{sd} ise s-d nokta çifti arasındaki uzaklıktır. Birbirini doğrudan görmeyen her müşteri çifti için Çizelge 5.2’deki sadece son *iki* satırlık-sütunluk kısımların değişmesiyle, *yeni matrisler*¹ üretilir. Daha sonra, her matris için ilgili müşteri çifti arasındaki, kılavuz noktalarından geçen, en az maliyetli (en kısa) yol ve toplam maliyeti (en kısa toplam mesafe), bu ara uzaklık matrisi üzerinde Dijkstra’nın en kısa yol algoritması işletilerek bulunur.

5.2.3 Nihai uzaklık matrisinin oluşturulması

Şekil 5.4’teki örneklerdeki dört müşteri (C1, C2, C3, C4) temel alınarak, işlemler altı müşteri çifti (C1-C2, C1-C3, C1-C4, C2-C3, C2-C4, C3-C4) için yinelenir ve “4 × 4”lük nihai uzaklık matrisinin üst üçgeni tamamlanır. Böylece, problem klasik CVRP’ye dönüşmüş olur. Önerilen çözüm ise tüm müşteri çiftleri arasındaki uzaklıkları içeren bu matris (Çizelge 5.3) temel alınarak uygulanır.

¹ Üretilen ara uzaklık matrislerinin sayısı, konumların görünür olma durumlarından bağımsız olarak, depo-müşteri konumlarının sayısının iki ile kombinasyonu kadardır. Kılavuz sayısı ise her ara uzaklık matrisinin sadece büyüklüğünü ve dolayısıyla Dijkstra’nın Algoritmasının işletim süresini etkilemektedir. Herhangi bir müşteri çifti arasındaki durumun diğer müşterilerden bağımsız olarak belirlenebilmesi ve hesaplamasal karmaşıklığı azaltabilmek amacıyla, tüm depo-müşteri-kılavuz noktası çiftleri arasındaki uzaklıklar tek çizelgede gösterilmemektedir.

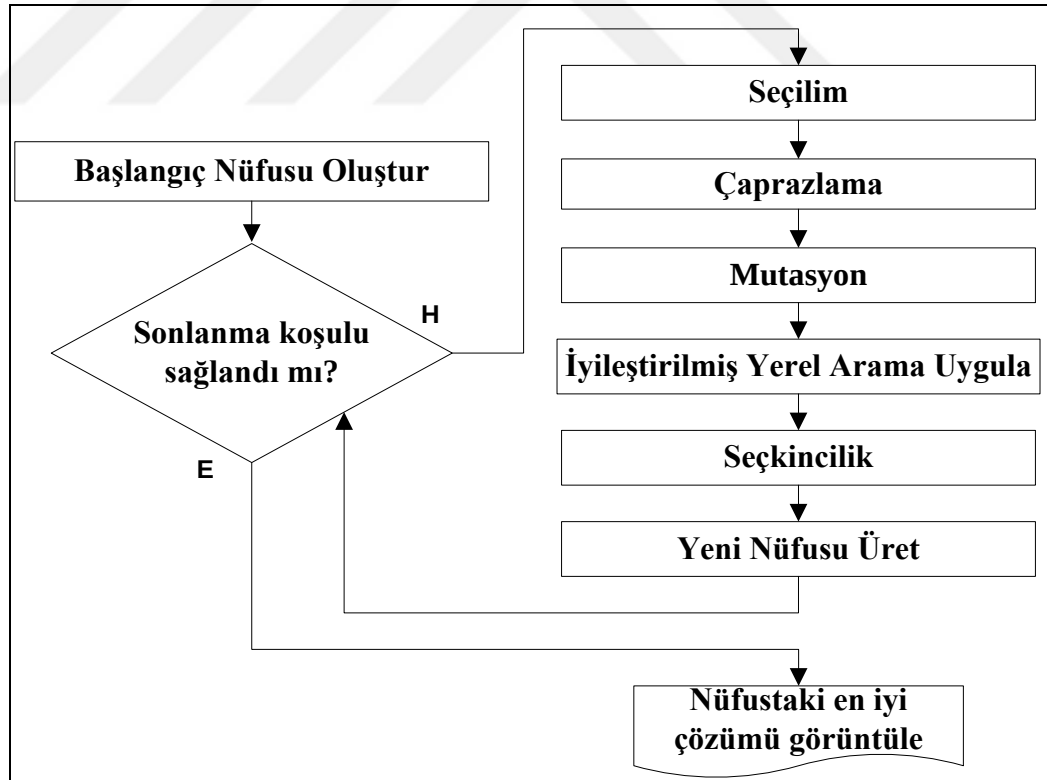
Çizelge 5.3: Nihai uzaklık matrisi.

Müşteri Konumları	C1	C2	C3	C4
C1	0	c_{C1C2}	c_{C1C3}	c_{C1C4}
C2	c_{C2C1}	0	c_{C2C3}	c_{C2C4}
C3	c_{C3C1}	c_{C3C2}	0	c_{C3C4}
C4	c_{C4C1}	c_{C4C2}	c_{C4C3}	0

Çizelge 5.3'teki nihai uzaklık matrisinde, kılavuzlara ilişkin uzaklıklar yer almamaktadır. Her müşteri çifti için ilgili ara uzaklık matrisi kullanılarak elde edilen uzaklık/maliyet, nihai uzaklık matrisinin ilgili tek elemanını oluşturur. Çözüm için geliştirilen algoritma bu matris üzerinde işletilerek, engel içeren ortamlardaki rota-güzergâhları belirlenir.

5.3 Genetik Algoritmalar ve Yerel Arama Tabanlı Eniyileme

Geliştirilen melez meta-sezgisel algoritmanın (Şekil 5.3'te *CVRP*'yi Çöz adımı) akış şeması Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5: Geliştirilen GA tabanlı melez meta-sezgisel algoritmaya ilişkin akış şeması.

Şekil 5.5'teki melez algoritmaya ait temel bileşenler (GA için Bkz. Bölüm 3.3 ve yerel arama için Bkz. Bölüm 3.4) ile ilgili ayrıntılar, ilerleyen kısımdaki alt bölümlerde verilmiştir. Bu taklitçi algoritma (Bkz. Bölüm 3.5) örneği, GA ile gerçekleştirilen bütünsel arama yerel arama ile desteklenerek elde edilmiştir.

5.3.1 Gösterim

Her rotayı ayrı bir vektörle ifade etmek yerine, rotalara ait müşteri gruplarının “0” araç tanımlayıcısı (depo konumu) ile birbirinden ayrıldığı, tek vektör içeren bir kromozom gösterimi tercih edilmiştir. Literatürde genellikle bu gösterim kullanılmaktadır: her rota, güzergâhı üzerindeki müşteri sırasını içerir ve her müşteri, her kromozomda tam olarak bir kez yer alır. Kromozom gösterimine ait uzunluklar dinamik olarak değişebilmektedir. Örneğin “{0 1 3 5 0 4 2 0 6}” kromozom gösterimi, Örnek 5.1’de verilen şu üç rotadan oluşmaktadır:

Örnek 5.1:

- **Rota #1:** Depo 1 3 5
- **Rota #2:** Depo 4 2
- **Rota #3:** Depo 6

Örnek 5.1’de, müşteriler üç rotada kümelendirilmişlerdir. Gösterimdeki sıfır sayısı rota sayısını ifade eder. Herhangi bir kromozomdaki konum sayısı ise müşteri sayısı (n) ile rota sayısının toplamı kadardır. Örneğin her aracın sadece bir müşterinin talebini karşılaması durumunda, gösterimdeki konum sayısı $2n$ olur.

Bir gösterimin uygun bir aday çözüme ait olabilmesi için bu gösterimde yer alan her rota probleme-özümlü kısıtları (Bkz. Bölüm 2.3) sağlamalıdır.

5.3.2 Başlangıç nüfus

Çözüme hızlı bir biçimde yakınsanabilmesi için başlangıç nüfus tamamen rasgele olmayacak şekilde üretilir. Müşteri çiftleri arasındaki uzaklıklar hesaplandıktan sonra, her konum için bu konuma en yakın uzaklıktaki belli sayıdaki konum belirlenir. Böylece, birbirine daha/en yakın ardışık nokta çiftleri

üretilecek, daha iyi aday çözümlerin oluşturulabilmesi mümkün olur.

Başlangıç nüfusu oluşturmak için *en yakın komşuluk algoritması* kullanılmıştır. Genetik süreç ise arama uzayında uygun olmayan herhangi bir çözüm mevcut olmayacak şekilde yapılandırılmıştır. Böylece, uygun olmayan çözümlerin giderilmesi veya uygun eşdeğerlerine dönüştürülmesi için ek bir işlem yapılması önlenmiştir. Örneğin Du and He (2012), VRP'ye ilişkin çalışmalarında, arama süresince uygun olmayan çözümlere olanak vermişlerdir.

5.3.3 Uygunluğun değerlendirilmesi

Maliyeti hesaplamak için kullanılan çok-hedefli amaç işlevi, hem rota sayısını hem de toplam mesafeyi en aza indirmeyi amaçlar. Nüfustaki “i.” bireyin uygunluk değeri, Denklem 5.1'deki F işlevi ile hesaplanır.

$$F(i) = \alpha \times m^i + \beta \times C^i \quad (5.1)$$

Denklem 5.1'de, α ve β sırasıyla, rota sayısı (m) ve tüm rotaların uzunlukları toplamı (C) için ilgili katsayı değerleridir (simgelere ilişkin ayrıntılar için Bkz. Bölüm 2.3.1, F işlevi ve katsayı değerleri ile ilgili ayrıntılar için Bkz. Chand and Mohanty (2013b)).

5.3.4 Seçim

Seçim için rasgele seçim, rulet-tekerleği seçimi, sıralama-tabanlı seçim ve turnuva seçimi olarak dört farklı seçim yöntemi (Bkz. Bölüm 3.3.5) kodlanmıştır.

5.3.5 Genetik işlemler

Tez çalışmasında, tek ve çift noktalı permütasyon çaprazlama işlemleri (Bkz. Bölüm 3.3.6) uygulanmıştır. Çaprazlama ile elde edilen çocuk bireyler, *2-opt*

algoritmasına tabi tutulurlar. Geliştirilen diğer mutasyon işleçlerinin uygulanması ise *seçimlik*¹ bırakılmıştır.

Genetik süreçte, yeterince iyi olmayan bireylerle de daha iyi bireyler elde edilebilir. Ayrıca bu durum, çeşitlilik sağlayarak yerel-en-iyi noktalara takılma durumlarını önleyebilir. Bu nedenle, ebeveyninden daha iyi olmayan çocuk bireylere de yaşama şansı verilir. Bazı kötü çözümler de dikkate alınarak, yerel aramayla bütünsel-en-iyi çözüme ulaşmak mümkün olabilmektedir.

5.3.6 Yerel arama

Meta-sezgisel yöntemlerin sezgisel yöntemlere göre daha iyi başarımlar sağladıkları bilinen bir gerçektir. Öte yandan, erken yakınsamaları önlemede ise yerel-en-iyi noktalarda takılma durumları en aza indirilmeye çalışılır. Bu amaçla ve hem algoritma işletim sürelerinin azaltılabilmesi hem de daha iyi sonuçlara ulaşılabilmesi için yerel arama uygulanabilir.

GA tabanlı yöntemde, çeşitlilik ve çözüme daha hızlı bir biçimde yakınsama sağlamak için 2-opt algoritması kullanılarak, rota-ıç ve rotalar-arası konum değişimleri ile toplam mesafe azaltılmaya çalışılır. Dizilimdeki değişim sonrasında, rota sayısı sabit kalacak şekilde rotalar-arası yüklemeler dengelenir veya art arda iki depo konumu ("0") yer alırsa (Örnek 5.2) ve elde edilen yeni kromozom olası bir çözüm olarak değerlendirilirse, mevcut rota sayısı bir azalır.

Örnek 5.2:

- **Eski çözüm** : 0 1 3 5 0 **4 2 0** 6 → 2-opt öncesi
- **Yeni çözüm** : 0 1 3 5 0 **0 2 4** 6 → 0 1 3 5 0 2 4 6

Tez çalışmasında, mutasyon olasılığına bağlı (mutasyon işleci) olarak, her nesil sonunda bireylere 2-opt algoritması uygulanır. Yavaşlığını önlemek için

¹ Mabgar (2008), CVRP ile ilgili çalışmasında mutasyon işlecini kullanmamıştır. Tez çalışmasında ise klasik mutasyon işleçleri yerine yerel arama uygulanmıştır.

sadece bireyi iyileştirecek durumlarda uygulanan iyileştirilmiş yerel arama stratejisinin sözde kodu ise Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4: GA tabanlı yöntem kapsamında uygulanan 2-opt algoritmasının sözde kodu.

Algorithm: applyImprovedLocalSearch(Chromosome individual)	
1.	while “individual için yerel-en-iyi noktaya ulaşılmadı” do // Kromozomda iyileşme olduğu sürece
2.	individual için en iyi “i, i + 1” ve “j, j + 1” kenar çiftini belirle
3.	if $distance(i, i + 1) + distance(j, j + 1) > distance(i, j) + distance(i + 1, j + 1)$ then
4.	2-opt algoritmasına göre kenarları takas et ve kromozomun uygunluk değerini güncelle
5.	end if
6.	end while

Çizelge 5.4'te, i ve j kromozomdaki genlere karşılık gelen değerler, $distance$ ise müşteri çiftleri arasındaki uzaklıkları içeren matristir. Tez çalışmasında, karmaşıklığı artırmamak için 2-opt dışındaki k -opt algoritmaları (Bkz. Bölüm 3.4) tercih edilmemiştir.

5.3.7 Bir sonraki neslin oluşturulması

Her nesilde, ilk olarak seçkincilik uygulanır ve en iyi kromozom çifti doğrudan bir sonraki nesle aktarılır. Daha sonra, nüfus büyüklüğünü (n) korumak için “ $n - 2$ ” çocuk birey üretilir ve elde edilen bireyler, en kötü birey ile başlayarak, ebeveyn bireylerle değiştirilir. Daha kötü bir birey çeşitliliği artırabilir ve böylece algoritmanın yerel-en-iyi noktalara takılma olasılığı düşebilir. Bu nedenle, ilgili çocuk bireyin uygunluk değeri yerine konacağı (takas edileceği) ebeveynin uygunluk değeri ile karşılaştırılmaz.

5.3.8 Sonlanma ölçütü

Algoritma işletimi, kullanıcı tarafından veya önceden belirlenen maksimum nesil sayısına ulaşılması durumunda sonlandırılır. Her işletim için rota sayısı ve toplam maliyet/mesafe, son iyileşmenin olduğu (en iyi değer bulunduğ) nesil değeri ve ilgili ana kadar geçen çalışma süresi ve toplam çalışma süresi ile ilgili bilgiler kaydedilir.

6. DAİRESEL ENGELLER İÇEREN ORTAMLARDA KILAVUZ NOKTALARI KULLANILARAK KAPASİTELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ

Bu bölümde, ilk olarak, dairesel engellere ilişkin yönteme ait ayrıntılar, engellerle olan kesişme durumları-yaklaşımları ve kesişme algoritması ve bu bölüm ile ilgili çözüm verilmiştir. Daha sonra, bu bölüme ait deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen deneyler sunulmuştur.

6.1 Dairesel Engeller İçeren Ortam

Dairesel engeller içeren ortam, mevcut depo-müşteri konumlarını, bu konumlar dışında yer alan farklı büyüklüklerdeki dairesel şekilleri ve bu şekillere göre ortama yerleştirilen kılavuz noktalarını içeren bir çalışma ortamıdır. Herhangi bir engel, genel olarak daire şeklinde ifade edilebilir. Bu nedenle engeller, yaklaşım yapılarak, *engelleri içine alan daireler şeklinde*¹ modellenirler.

Kılavuz noktalarının kullanılma nedenleri şunlardır:

- Çemberler üzerinden veya eğrisel olarak hareket edilemediği için noktalar arasındaki hareketler, engellerin çevresinden dolaşılacak şekilde ifade edilebilir. Ayrıca, bir noktadan çembere olan teğet noktasından başka bir noktaya hareket etme durumunda, noktalar arasındaki hattın çemberi iki parçaya ayırması (*engelin içinden geçiş*) ve çember üzerinde küçük bir kiriş (*crossing line*) oluşması söz konusu olabilmektedir.
- Çözümde yer alan rota-güzergâhları boyunca olabildiğince ortadan (en kısa mesafe ile) gitmek
- İşlem sayısını (çözümün karmaşıklığı) azaltmak

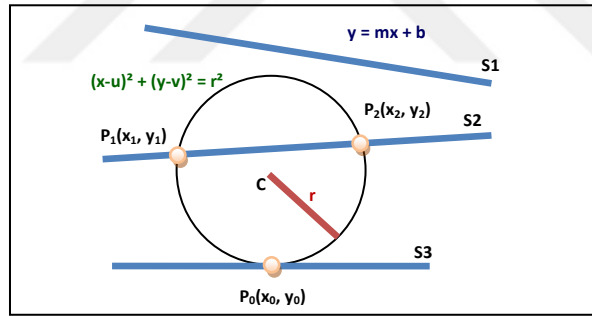
¹ Engel içeren ortamlar için önerilen çözümlerde, dairesel bir engel, bir çokgen (örneğin kare için Bkz. Şekil 5.4(b)) bir çemberin (Bkz. Şekil 5.4(a)) içerisinde yer alacak ve çemberin sınırları bu çokgenin köşelerinden geçecek şekilde modellenebilir.

- Araçların noktasal olmadığı durumlarda, araçlar iki-boyutlu bir alanı kaplarlar. Bu durumda, engellere ait köşeler üzerinden geçemezler ve rotaların engellere belli uzaklıkta olacak şekilde belirlenmesi gerekir. Ayrıca, ortamda dar aralıklar olabilir ve/veya araçlara-engellere ilişkin tehlikeli durumlardan (örneğin sıcak cisimler) kaçınmak için engellere belli uzaklıklardaki yolların kullanılması gerekebilir.

6.2 Dairesel Engeller için Ortama İlişkin Kesişmeler

Kesişme durumlarını belirlemek amacıyla, bir çemberin bir doğru ile olan şu durumları dikkate alınır:

- Kesişmeme (Şekil 6.1’de S1 doğru parçası)
- Teğet (*tangent line*) veya giriş (*secant*)
 1. İki noktada kesişme (Şekil 6.1’de S2 doğru parçası)
 2. Tek noktada kesişme (Şekil 6.1’de S3 doğru parçası)



Şekil 6.1: Çember ile doğru arasındaki durumlar.

Herhangi bir dairesel engele karşılık gelen çemberi ifade eden elips, ilk olarak merkezde konumlandırılır ve eksenlerinin yarı değerleri (genişlik ve yükseklik) hesaplanır. Karesel¹ değişkenler ve daha sonra diskriminant²

¹ Karesel (*quadratic*), ikinci dereceden denklemlere ilişkin gösterim için kullanılan bir kavramdır.

² Diskriminant, matematik biliminde cebirsel bir kavramdır. Gerçek katsayılı ikinci derece polinom denklemin köklerinin bulunması için diskriminant değerleri hesaplanır.

hesaplanır. Delta sıfır ise tek çözüm, sıfırdan büyükse iki çözüm elde edilir. Dairesel engellerle kesişme durumlarını (kesişme olmaması veya kesişmenin hangi noktalarda olduğu) belirlemek için bu delta değerinden kökler bulunur.

Herhangi bir nokta (depo-müşteri-kılavuz konumu) çifti arasındaki düz bir hattın, herhangi bir dairesel engelle kesişme durumunu belirlemek için geliştirilen algoritmanın sözde kodu Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1: İki nokta arasındaki potansiyel hat üzerindeki dairesel engelleri tespit eden sözde kod.

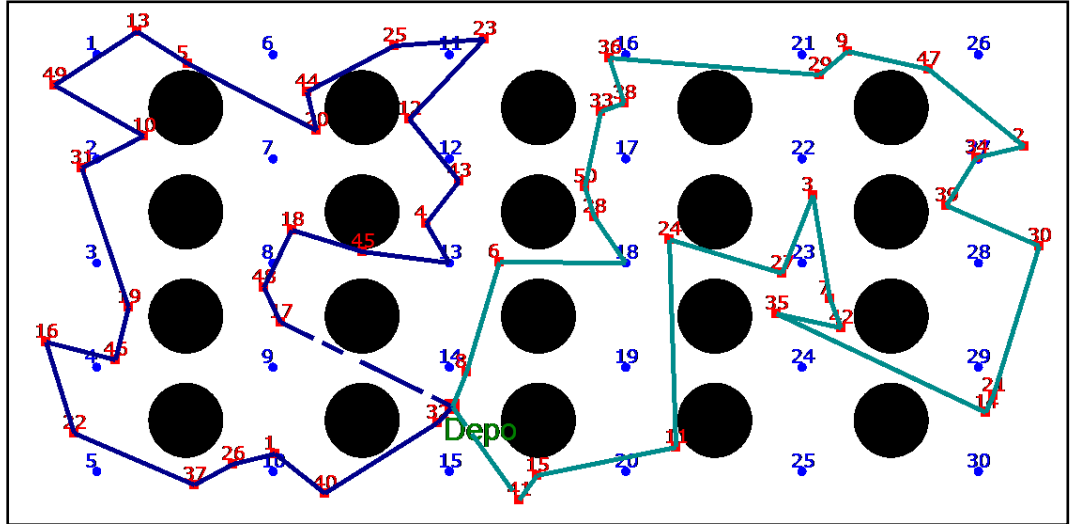
Algorithm: determineCircularObstaclesBetweenLocationPair(PointF point1, PointF point2)	
1.	for mevcut engel in “ortamda tanımlı tüm engeller” do
2.	if “point1-point2 nokta çifti arasındaki potansiyel hat mevcut engelin içinden geçiyor” then
3.	return true // bu iki nokta arasında doğrudan hareket edilemez
4.	end if
5.	end for
6.	return false // kesişmeme durumu

Çizelge 6.1’de, sonuç *false* ise ilgili nokta çifti arasındaki uzaklık doğrudan hesaplanabilir; çünkü bu iki nokta arasında doğrudan hareket edilebilir.

6.3 Dairesel Engeller İçeren Ortamlar için Çözüm

Bu çözümde, düğümler-arası dolaşmalar, dairesel engeller dikkate alınarak ve kılavuz noktaları üzerinden gerçekleştirilir ve en uygun rota belirlenir.

Şekil 6.2’de, engellerin düzenli (belli büyüklüklerde) daireler şeklinde tanımlandığı durumda CVRP için elde edilen örnek bir sonuç verilmiştir. Şekil 6.2’de, daire şeklindeki 20 (4×5) engel ortama düzenli aralıklarla dağıtılmıştır. Bu örnekte, rasgele bir depo ve 50 müşteri konumu ve 30 (5×6) kılavuz noktası mevcuttur. Her müşterinin talebi 10 birim ve araç kapasitesi 250 birimdir. 500 (50×10) birimlik toplam talep ise iki rotada karşılanır.



Şekil 6.2: Dairesel engeller içeren bir ortamda CVRP çözümü (iki rota için).

Şekil 6.2’de, birbirini doğrudan görmeyen konumlar arasındaki dolaşmalar kılavuz noktaları (küçük daireler) üzerinden gerçekleştirilir.

6.4 Dairesel Engeller İçeren Ortamlar için Deneysel Çalışmalar

Bu alt bölümde, ilk olarak, veri kümesi ve deneysel kurulum ile ilgili bilgiler verilmiştir. Daha sonra, engel içermeyen ortamlara ilişkin deneyler sunulmuş ve GA tabanlı yöntemin başarımı gösterilmiştir. Son olarak, dairesele engellerin yerleştirilmesi ile ilgili ayrıntılara ve farklı durumlar için gerçekleştirilen deneylere yer verilmiştir.

6.4.1 Veri kümesi ve deneysel kurulum

Çalışma ortamı, benzetim aracının ekran boyutlarına (genişlik ve yükseklik değerleri) uyumlu olarak, “554 × 554” birim² olacak şekilde, bir arazi, harita veya sahne olarak ele alınır. Ön-tanımlı ortam boyutları, engel yarıçapını kolaylıkla değiştirebilme olanağı tanır. Engellerin küçük olduğu durumlarda, etkileri yeterince gözlemlenemeyebilir. Bu nedenle, sahne belli sayıda engeli içerebilecek şekilde ve karesel olarak ayarlanmıştır. Karesel bir sahneye daha büyük engeller yerleştirilebilir. Ayrıca bu durumda, sahnenin dikdörtgensel olduğu (“1127 × 554” birim²) duruma göre, daha başarılı sonuçlar elde etmek mümkün olabilmektedir.

Engel içermeyen ortamlara ilişkin deneylerde (Bölüm 6.4.2), literatürdeki *VRPLIB* kütüphanesinde yer alan bazı CVRP örneklerine ait bilgiler (depo-müşteri konumları, talep miktarları ve araç kapasitesi) kullanılmıştır. Çözüm yönteminin istatistiksel başarısını gösterebilmek için bu deneyler aynı nokta kümeleri ile yinelenmiş ve ortalamalar alınmıştır.

Engel içeren ortamlara ilişkin diğer deneylerde (Bölüm 6.4.4 ve Bölüm 6.4.5) ise talep miktarları ve araç kapasitesi sabit olacak şekilde, rasgele konum kümeleri kullanılmıştır. Bu deneylerde, her müşterinin talebi 10 birim ve araç kapasitesi 250 birimdir. Örneğin bu durumda, 100 müşteri konumu içeren her problemin çözümü için rota sayısı dört olur. Müşteri sayısının değiştiği deneylerde (Bölüm 6.4.4) ise çözümdeki rota sayıları da değişebilmektedir. Çözüm yönteminin istatistiksel başarısını gösterebilmek için bu deneyler farklı nokta kümeleri ile yinelenmiş ve ortalamalar alınmıştır.

Ayrıca, geliştirilen algoritmayı test etmek amacıyla yapılan her başarımlı testi için en iyi değer bulunduğusu nesil değeri ve ilgili ana kadar geçen çalışma süresi ve toplam çalışma süresi ile ilgili bilgiler de kaydedilmiştir.

Tüm deneylerde kullanılan genetik algoritma değişkenleri ve ilgili değerler Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2: GA tabanlı yöntemin değişkenleri ve varsayılan değerler.

Değişken	Değer
Nüfus büyüklüğü	100
Maksimum nesil sayısı	1000
Seçim yöntemi	Turnuva seçimi
Çaprazlama işleci ve yerel arama (<i>mutasyon işleci olarak</i>) için olasılık değerleri	%80 – %5
α ve β değerleri (Chand and Mohanty, 2013b)	0.7 – 0.5
Bir sonraki nesil için seçkin birey sayısı	2

Genetik algoritma gerçekleştiriminde, başlangıç nüfusu oluşturmak için kullanılan *en yakın komşuluk algoritması* kapsamında, en yakın komşuluk değeri 5, algoritmanın uygulanma olasılığı ise %90 olarak tercih edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen yazılım ve oluşturulan bilgisayar grafikleri destekli benzetim ortamı için *Microsoft Visual Studio 2010* platformunda C# programlama dili tercih edilmiştir. Deneyler için Windows 7 işletim sistemi yüklü, 2.13 GHz işlemciye ve 3GB ana belleğe sahip, Intel Pentium Dual CPU bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır.

6.4.2 Yöntemin engel içermeyen ortamlarda test edilmesi

İlk olarak, *TSPLIB* kütüphanesinde yer alan üç örnek (Discrete and Combinatorial Optimization, 2008) temel alınarak, TSP için deneysel çalışma yapılmıştır. Geliştirilen program her örnek için 100 kez çalıştırılarak, güzergâh, minimum ve maksimum uzaklıklar, ortalama uzaklık, standart sapma ve ortalama hata (Denklem 6.1'deki formülle tanımlanır) değerleri belirlenmiştir (Çizelge 6.3).

$$\text{Ortalama Hata (\%)} = \frac{\text{mean} - \text{best_known}}{\text{best_known}} \times 100 \quad (6.1)$$

Denklem 6.1'de, *mean* ortalama uzaklık, *best_known* bilinen en iyi değerdir.

Çizelge 6.3: TSP çözümüne ilişkin sonuçlar.

ÖRNEK	Bilinen En İyi Değer (*)	Minimum Uzaklık	Maksimum Uzaklık	Ortalama Uzaklık	Standart Sapma	Ortalama Hata	En İyi Değer Adedi
Berlin52	7544,37	7544,37	7544,37	7544,37	0	0	100
KroA100	21282	21282	21282	21282	0	0	100
TSP225	3859	3859	3896	3860,38	6,42	%0,04	95

* (Discrete and Combinatorial Optimization, 2007)

TSP için yapılan deneysel çalışmadan sonra, geliştirilen algoritma engel içeren ortamlara uyarlanmadan önce, *VRPLIB* kütüphanesinde yer alan bir dizi örnek (Networking and Emerging Optimization, 2013) temel alınarak, CVRP için de deneysel çalışma yapılmıştır. Geliştirilen program her örnek için 10 kez çalıştırılarak, rota sayıları ve güzergâhlar, minimum ve maksimum uzaklıklar, ortalama uzaklık, standart sapma ve ortalama hata değerleri ve araçların doluluk oranları (Denklem 6.2'deki formülle tanımlanır) belirlenmiştir (Çizelge 6.4).

$$\text{Araç Doluluk Oranı} = Q \div (m \times q) \quad (6.2)$$

Denklem 6.2’de, araç doluluk oranı, tüm müşterilerin toplam talebi (Q : araçlardaki toplam yükleme) tüm araçların toplam kapasitesine bölünerek (simgelere ilişkin ayrıntılar için Bkz. Bölüm 2.3.1) hesaplanır.

Çizelge 6.4: Engel içermeyen ortamlarda CVRP çözümüne ilişkin sonuçlar.

ÖRNEK	Bilinen En İyi Değer (*)	n	m	q	Geliştirilen Yöntem ile Elde Edilen Maksimum Uzaklık Değeri	Araç Doluluk Oranı
att-n48-k4	40002	47	4	15	40002	0,73
A-n34-k5	778	33	5	100	778	0,92
A-n80-k10	1763	79	10	100	1763	0,94
B-n39-k5	549	38	5	100	549	0,88
E-n22-k4	375	21	4	6000	375	0,94
E-n23-k3	569	22	3	4500	569	0,75
E-n30-k3	534	29	3	4500	534	0,94
E-n51-k5	521	50	5	160	521	0,97
E-n101-k8	815	100	8	200	815	0,91
F-n45-k4	724	44	4	2010	724	0,90
F-n72-k4	237	71	4	30000	237	0,96

* (Computational Infrastructure for Operations Research, 2003)

Çizelge 6.4’te, n müşteri sayısı, m araç sayısı, q ise araç kapasitesidir (Bkz. Bölüm 2.3.1). Çizelgede görüldüğü gibi, tüm örnekler için her çalıştırmada, minimum araç sayıları ve en kısa toplam mesafeler bulunmuştur. Ortalama hata ve standart sapma değerleri sıfırdır ve mevcut durumda belirgin bir kararlılık vardır. Elde edilen sonuçlar ise son derece başarılıdır (en iyi değerler için Bkz. Lysgaard et al., 2004; Fukasawa et al., 2006; Stanojević et al., 2013; Uchoa et al., 2014).

6.4.3 Dairesel engellerin yerleştirilmesi

Bölüm 6.4.2’de, engel içermeyen ortamlara ilişkin deneylerdeki CVRP örnekleri (Çizelge 6.4) için en iyi değerler ile tam yakınsama sağlandığı gösterilmiştir. Bu alt bölümde ise engel içeren ortamlara ilişkin deneyler için ortama matris şeklinde (yatayda ve düşeyde belli sayılarda olacak şekilde) yerleştirilen engellerin ve kılavuz noktalarının oluşturulması amacıyla geliştirilmiş algoritmalar sunulmuştur. Depo-müşteri konumları oluşturulmadan önce, ortama

homojen bir biçimde dağılacak engeller ve kılavuzlar oluşturulur. Engel içeren ortamlara ilişkin diğer ayrıntılar 5. Bölüm’de verilmiştir (Bkz. Bölüm 5.1). Dairesel engellere ilişkin kısıtlar ise şunlardır:

- Ortamdaki engeller temel alınarak, depo-müşteri konumları ve engeller dışında ek kılavuz noktaları tanımlanır (ortama yeni noktalar ekleme söz konusu).
- Karmaşıklığı artırmamak için ortamda aynı satır/sütun üzerinde (düzenli bir biçimde) bulunan engellerin aralarına birer tane kılavuz noktası yerleştirilmiştir.
- Aynı satır/sütun üzerinde bulunan kılavuz noktaları arasında, herhangi bir engelin içinden geçiş (engel ile kesişme) söz konusu olmadan doğrudan hareket edilebilir.

Bu kapsamda dikkate alınan değişkenler ise şunlardır:

- W ve H sırasıyla, çalışma ortamının genişlik ve yükseklik değerleridir.
- R ve C sırasıyla, matris şeklinde yerleştirilecek engeller için matrisin satır ve sütun sayıdır.
- $radius$ engel yarıçap değeri, $diameter$ ise engel çap değeridir.

Engeller, ortama düzenli aralıklarla ve matris şeklinde yerleştirilirler. Bu işlem için geliştirilen algoritmanın sözde kodu ise Çizelge 6.5’te verilmiştir.

Çizelge 6.5: Dairesel engelleri üreten yöntemin sözde kodu.

Algorithm: createCircularObstacles()

1. $wR = W / (1 + R)$
2. **if** $wR < diameter$ **then**
3. **Hata:** “Bu girdilerle engeller oluşturulamaz!”
4. **return**
5. **end if**
6. $hR = H / (1 + C)$
7. **if** $hR < diameter$ **then**
8. **Hata:** “Bu girdilerle engeller oluşturulamaz!”
9. **return**
10. **end if**
11. engel listesini temizle
12. $x = -radius$

```

13. for  $r = 1$  to  $R$  do
14.      $x = x + wR$ 
15.      $y = -radius$ 
16.     for  $c = 1$  to  $C$  do
17.          $y = y + hR$ 
18.         “ $x, y$ ” merkezli ve  $radius$  yarıçaplı dairesel engeli üret ve listeye ekle
19.     end for
20. end for

```

Bu algoritma ile “ $R \times C$ ” adet düzenli engel üretilir. Engeller, ortamda homojen bir biçimde yer alacak şekilde ortama yerleştirilirler (Bkz. Şekil 6.2).

Engel büyüklüğü, tüm engellerin ortama sığabileceği maksimum büyüklüğü aşmayacak ve engeller birbiri ile kesişmeyecek şekilde belirlenir. Aynı satır/sütun üzerindeki her ardışık engel çifti arasındaki veya ortamın bir kenarı ile bu kenara en yakın engel hattı üzerindeki engeller arasındaki yakınlık/boşluk (*gap/space*) değeri ise ortamın büyüklüğüne, engel sayısına ve engel büyüklüğüne bağlıdır.

Kılavuzların oluşturulması

Kılavuz noktaları, her engel, bu engele en yakın *dört* kılavuz tarafından ve *dört* köşe uçtan görülebilecek ve bu kılavuzların ağırlık merkezi bu engelin merkezi olacak şekilde, ortama düzenli aralıklarla ve matris şeklinde yerleştirilirler. Bu işlem için geliştirilen algoritmanın sözde kodu ise Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6: Kılavuz noktalarını üreten yöntemin sözde kodu.

```

Algorithm: createGuides()
1.   $rUpper = (R + 1) \times 2$ 
2.   $cUpper = (C + 1) \times 2$ 
3.   $wR = W / rUpper$ 
4.   $hR = H / cUpper$ 
5.  kılavuz listesini temizle
6.   $r = 1$ 
7.  while  $r < rUpper$  do
8.       $x = r \times wR - 1$ 
9.       $c = 1$ 
10.     while  $c < cUpper$  do
11.          $y = c \times hR - 1$ 
12.         “ $x, y$ ” konumundaki kılavuz noktasını üret ve listeye ekle
13.          $c = c + 2$ 

```

14.	end while
15.	$r = r + 2$
16.	end while

Bu algoritma ile “ $R \times C$ ” adet düzenli engel için “ $(R + 1) \times (C + 1)$ ” adet düzenli kılavuz noktası üretilir. Kılavuzlar, ortamda homojen bir biçimde yer alacak şekilde ortama yerleştirilirler (Bkz. Şekil 6.2).

Depo-müşteri konumlarının üretilmesi

Bu kapsamda, bir noktanın bir daire içerisinde yer alması durumu ele alınmıştır. Depo-müşteri konumları olarak, engeller ve kılavuzlar dışındaki alanlar kullanılır. Bu nedenle ortama, ilk olarak engeller ve kılavuzlar, daha sonra depo-müşteri konumları eklenir.

Engel içeren ortamlarda CVRP çözümü için geliştirilen yöntem

Dairesel engeller içeren ortamlarda CVRP çözümü için geliştirilen yöntemin sözde kodu Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.7: Dairesel engeller içeren ortamlarda CVRP’yi çözen yöntemin sözde kodu.

Algorithm: solveCVRPWithCircularObstacles()

1. **createCircularObstacles()** // “ $R \times C$ ”lik düzenli engelleri üret
2. **createGuides()** // “ $(R + 1) \times (C + 1)$ ”lik düzenli kılavuzları üret
3. Tüm *guide1-guide2* kılavuz çiftleri arasındaki uzaklıkları hesapla, *sabit kılavuz matrisini* üret:
4. **calculateDistanceValueBetweenNodePair**(*guide1, guide2*)
5. Engelleri ve kılavuzları dikkate alarak, *n* müşteri için *rasgele konum bilgisini* üret
6. Tüm *customer1-customer2* müşteri çiftleri (*i, j*) arasındaki uzaklıkları hesapla, *nihai uzaklık matrisini* üret:
7. **calculateDistanceValueBetweenNodePair**(*customer1, customer2*)¹
8. *Hesaplanan uzaklık değerini*, nihai uzaklık matrisinin “*i, j*” hüccesine yerleştir
9. Nihai uzaklık matrisini kullanarak, geliştirilen melez meta-sezgisel algoritma ile CVRP çözümünü gerçekleştir

¹ Çizelge 6.7’deki algoritmanın işletimiyle, “ $(R + 1 + 2) \times (C + 1 + 2)$ ”lik ara uzaklık matrisleri (Bkz. Çizelge 5.2) ve “ $n \times n$ ”lik nihai uzaklık matrisi (Bkz. Çizelge 5.3) üretilir.

Deneysel çalışmalara ilişkin kurulum

Dairesel engeller içeren ortamlara ilişkin deneysel çalışmalar için engeller ve kılavuz noktaları, ortama düzenli aralıklarla ve matris şeklinde yerleştirilirler. Depo-müşteri konumları, herhangi bir *engelin parçası*¹ olmayacak ve kılavuz noktaları ile çakışmayacak şekilde rasgele üretilir. Deneylerde, müşteri sayısı, engel sayısı ve engel büyüklüğü değişimlerinin, kılavuz noktaları üzerinden belirlenen rota-güzergâhlarını ve toplam mesafeleri nasıl etkilediği incelenmiştir. Talep miktarı, araç kapasitesi ve rota sayısı değişimleri ise dikkate alınmamıştır.

Deneylerde, sahneyi daha iyi bir biçimde kullanmak için engeller ortama, ortam üzerinde engeller dışında yeterince boşluk oluşabilecek ve engeller arası çok dar olmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca her deneyde, ortamın engel doluluk oranı (tüm engellerin ortamda kapladığı alan) da hesaplanmıştır. Bu kapsamda kullanılan terimler ise Çizelge 6.8’de verilmiştir:

Çizelge 6.8: Deneylerde elde edilen sonuçlara ilişkin olarak kullanılan terimler.

İfade	Terim	İfade	Terim
Müşteri Sayısı	CC	Toplam Uzunluk	TL
Rota Sayısı	RC	Nesil Tekrarı	GR
Engel Sayısı	OC	Çalışma Süresi (ms)	RT
Kılavuz Sayısı	GC	Toplam Çalışma Süresi (ms)	TRT
Engel Büyüklüğü	OS	Ortalama	Avg
Ortamın Engel Doluluk Oranı (%)	OFR	Standart Sapma	SD

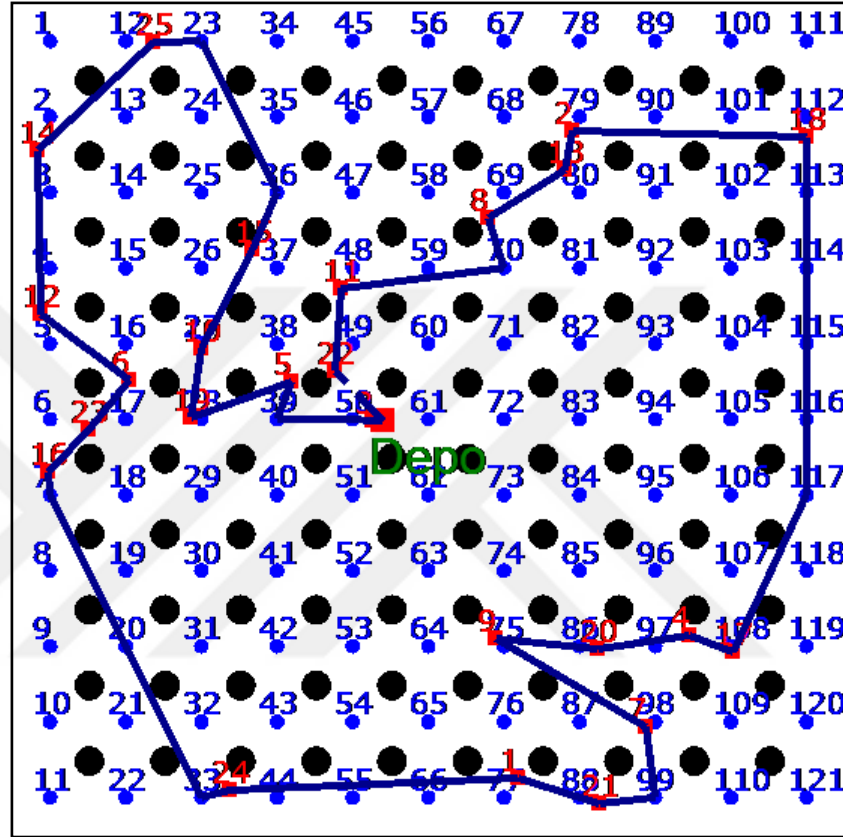
Deneylere ilişkin çizelgeler ve grafikler, ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

6.4.4 Farklı müşteri sayıları için deneyler

Bu deneylerde, engel sayısı 100 (10×10) ve engel büyüklüğü 10 (100 engel için maksimum yarıçap değeri) olacak şekilde, müşteri sayısı değiştirilir. İlk olarak, 100 engel ortama yerleştirilir, 100 müşteri sayısı ile teste başlanır ve deney 10 kez yinelenir. Daha sonra, aynı engel kurulumu için mevcut müşteri

¹ Rasgele üretilecek konumlar, engellerin sınırları üzerinde olabilirler; ama herhangi bir engelin (daireler/çokgenler) içerisinde yer alamazlar.

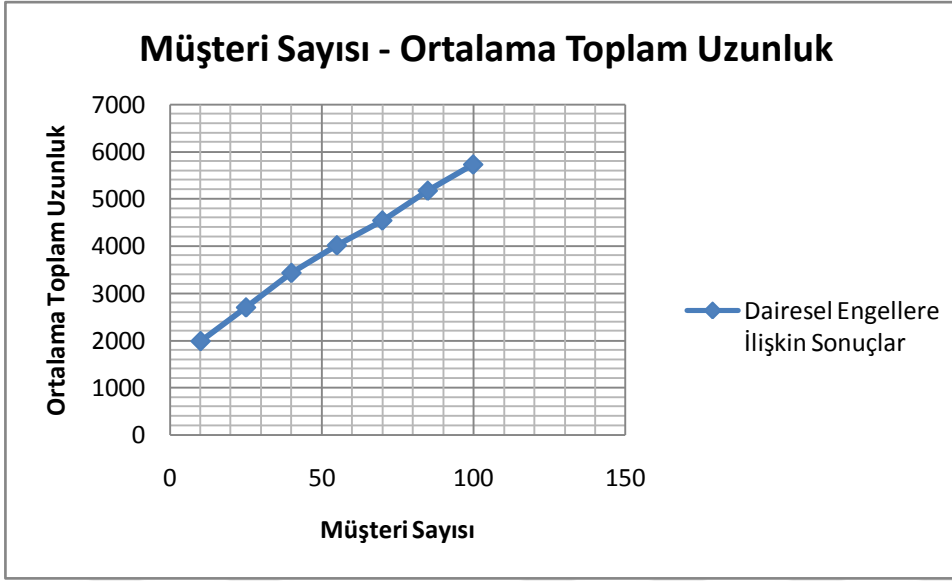
konumlarından rasgele 15 müşteri çıkarılır ve bir sonraki müşteri kümesi elde edilir. Deneyler, 10 müşteriye kadar olan kurulumlar için bu şekilde (müşteri sayısı azaltılarak) gerçekleştirilir. Bu işlemler, farklı müşteri yerleşimleri için yinelenmemiştir. Engel doluluğu %10,24 olacak şekilde, örnek bir ekran görüntüsü Şekil 6.3'te, sonuçlar ise Çizelge 6.9'da ve Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.3: Ortamda 25 müşteri, 100 engel ve 121 kılavuz noktası mevcut olup; tüm talepler tek rotada karşılanmaktadır.

Çizelge 6.9: Sabit engel sayısı-büyüklüğü ile müşteri sayısının değişimi.

CC		10	25	40	55	70	85	100
RC		1	1	2	3	3	4	4
TL	Avg	1981	2696	3429	4015	4540,2	5172,7	5728,6
	SD	0	0	0	0	4,94	59,68	25,21
GR	Avg	1,1	10,3	37,8	29,5	59,7	73,1	80,9
	SD	0,3	25,26	21,2	19,8	22,08	20,73	9,4
RT	Avg	1,4	49,4	355,4	585,7	1899,7	3731,5	5762,9
	SD	4,2	104,3	186,39	356,59	583,07	875,34	622,81



Şekil 6.4: Farklı müşteri sayıları için toplam rota uzunlukları.

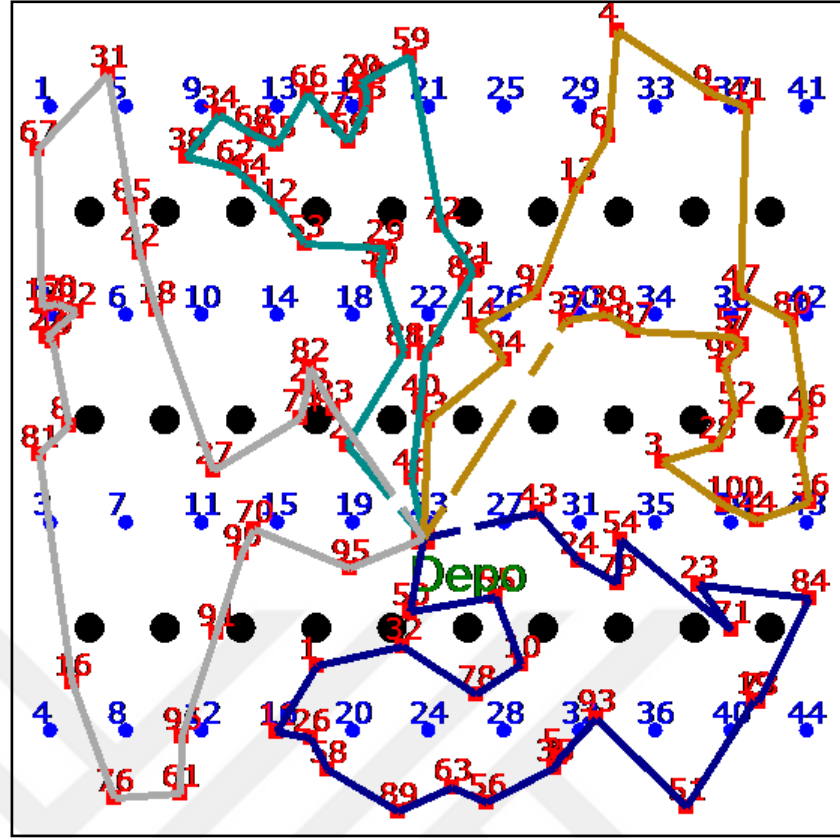
Şekil 6.4'te, müşteri sayısının artmasıyla, karmaşıklığın ve toplam mesafenin doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Aynı engel kurulumu için ortamdaki mevcut müşteri konumlarının azalmasıyla, toplam maliyet doğrusal bir biçimde azalmaktadır.

6.4.5 Ortamın farklı engel doluluk oranları için deneyler

Bu kapsamda, müşteri sayısı 100 olacak şekilde, hem farklı engel sayıları hem de farklı engel büyüklükleri temel alınmıştır.

Farklı engel sayıları için deneyler

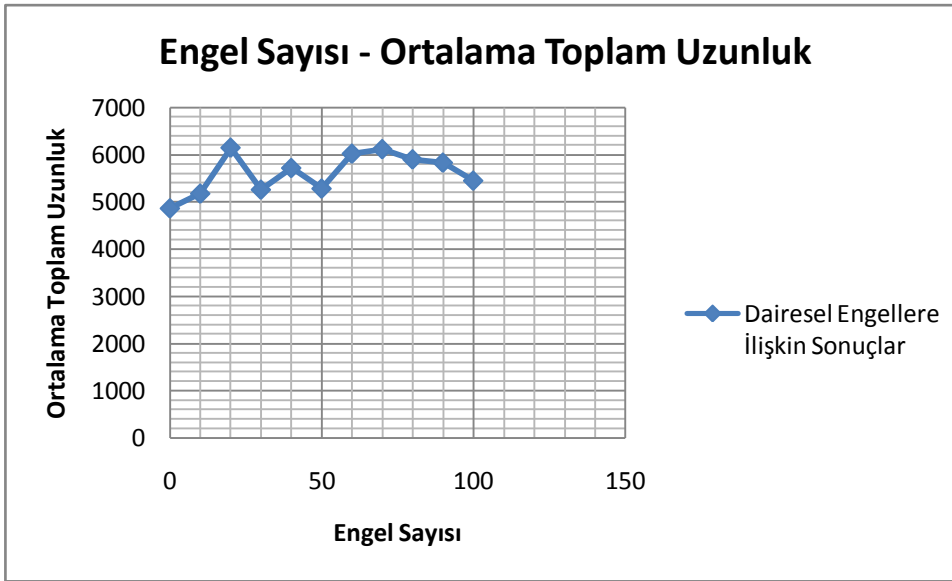
Bu deneylerde, engel büyüklüğü 10 (100 engel için maksimum yarıçap değeri) olacak şekilde, engel sayısı değiştirilir. Engel sayısının değişmesiyle, engellerin konumları ve kılavuzların hem sayısı hem de konumları değişir. Bu nedenle, müşteriler tüm engel yerleşimleri için ortak bir yere yerleştirilemezler. Bu duruma bağlı olarak, her engel sayısı deneyi için 100 müşteri konumu ortama yerleştirilir ve rotalar belirlenir. Bu işlemler, farklı müşteri yerleşimleri için 10 kez yinelenmiştir. Örnek bir ekran görüntüsü Şekil 6.5'te, sonuçlar ise Çizelge 6.10'da ve Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.5: Ortamda 100 müşteri, 30 (3×10) engel ve 44 kılavuz noktası mevcut olup; tüm talepler dört rotada karşılanmaktadır.

Çizelge 6.10: Sabit müşteri sayısı ve engel büyüklüğü ile engel sayısının değişimi.

OC		X	1 x 10	2 x 10	3 x 10	4 x 10	5 x 10	6 x 10	7 x 10	8 x 10	9 x 10	10 x 10
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
GC		0	22	33	44	55	66	77	88	99	110	121
OFR		0	1,02	2,05	3,07	4,09	5,12	6,14	7,17	8,19	9,21	10,24
TL	Avg	4863,9	5174,9	6144,5	5258,3	5715,8	5281,2	6018,7	6113,9	5898,2	5828,5	5447,9
	SD	34,57	33,27	56,91	130,05	29,42	52,32	47,6	48,17	39,81	26,65	91,03
GR	Avg	85	84,3	87,2	82,9	78,1	86,6	72,9	83,9	81,5	88,4	91,7
	SD	11,97	16,26	15,31	16,69	19,45	11,64	18,79	13,08	18,22	9,07	6,03
RT	Avg	6608,8	6018	7020,8	5787,4	6506,8	6204	6094,8	6119,1	5915,2	6629	6959,8
	SD	732,48	902,24	1170,6	1070,84	1425,56	542,79	1150,55	1101,82	1201,11	576,71	433,17

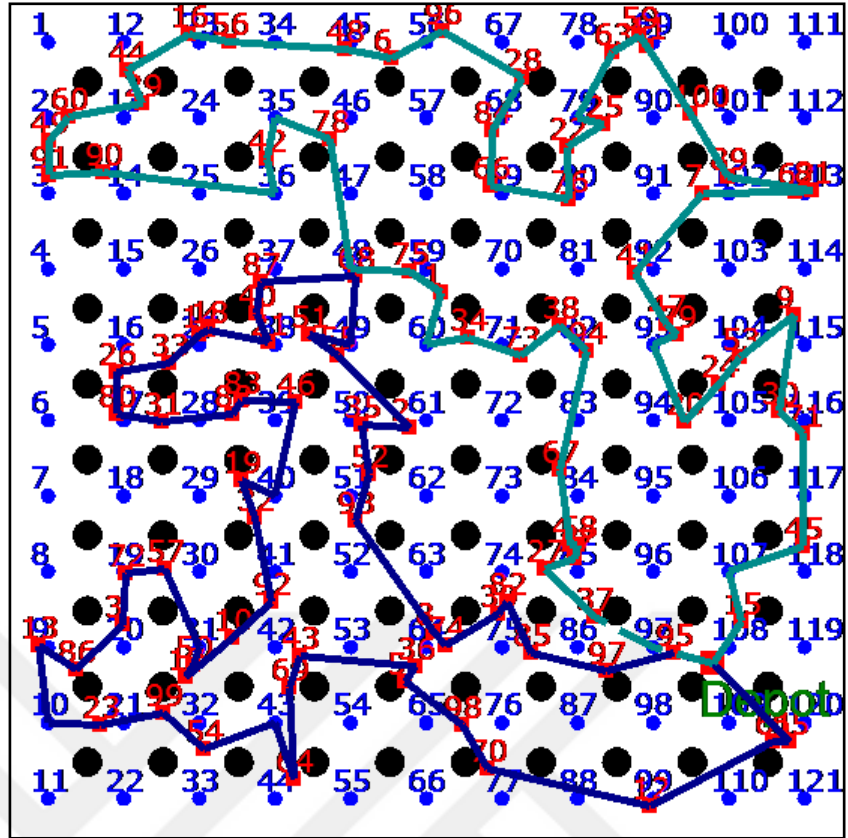


Şekil 6.6: Farklı engel sayıları için toplam rota uzunlukları.

Şekil 6.6’da, engel sayısının artmasıyla, karmaşıklık büyük ölçüde artar. Toplam mesafe ise hem artış hem de azalma gösterebilmektedir. Engel sayıları değiştiğinde, engellerin yerleri de değişmektedir. Bu nedenle, tüm engel sayısı deneyleri için müşteriler ortak noktalara yerleştirilememektedir ve bu deneylerde sabit konumlardaki belli bir müşteri kümesi kullanılmamıştır. Engel sayısının artışı, kılavuz noktalarını ve doğal olarak da yol alternatiflerini artırır ve bu nedenle toplam mesafe azalabilir. Örneğin kılavuz noktalarındaki artış, grafiğin sonunda toplam mesafenin azalmasına neden olmuştur.

Farklı engel büyüklükleri için deneyler

Bu deneylerde, engel sayısı 100 (10×10) olacak şekilde, engel yarıçap değeri değiştirilir. İlk olarak, ortamda en büyük boyutlu 100 adet dairesel engel (engellerin ortamda en çok yer kapladığı engel kurulumu) olacak şekilde, 100 müşteri konumu ortama yerleştirilir. Her engel büyüklüğü deneyinde, müşteriler değiştirilmeden, engel boyutları en küçük engel boyutuna kadar küçültülür. Bu işlemler, aynı müşteri yerleşimi için 10 kez yinelenmiştir. Örnek bir ekran görüntüsü Şekil 6.7’de, sonuçlar ise Çizelge 6.11’de ve Şekil 6.8’de verilmiştir.

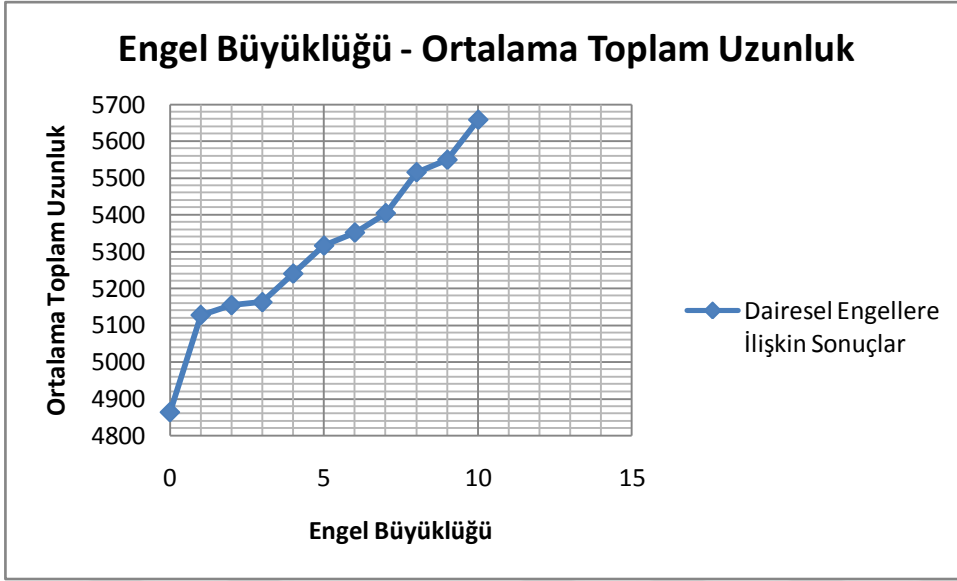


Şekil 6.7: Ortamda 100 müşteri, 100 engel ve 121 kılavuz noktası mevcut olup; tüm talepler iki rotada karşılanmaktadır.

Şekil 6.7’de, araç kapasitesi 500 birim, engel yarıçapı ise 10’dur.

Çizelge 6.11: Sabit müşteri ve engel sayıları ile engel büyüklüğünün değişimi.

OS		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
OFR		0	0,10	0,41	0,92	1,64	2,56	3,68	5,02	6,55	8,29	10,24
TL	Avg	4863,9	5127,5	5154,3	5162,4	5239,9	5315,9	5351,4	5403,9	5515,1	5548,8	5657,4
	SD	34,57	25,17	27,63	17,52	24,01	21,98	15,08	20,67	35,57	26,6	41,44
GR	Avg	85	526	482,8	618,8	504,3	420,7	570,2	647,2	536,6	734,4	479
	SD	11,97	261,67	273,68	293,97	243,38	257,06	260,42	236	245,52	206,77	194,6
RT	Avg	6608,8	62895,6	61126,7	63413,2	64833,9	60147	61283,4	59522,8	61381,7	59529,4	61816,1
	SD	732,48	3679,75	3016,79	2286,31	2301,07	4298,14	3201,89	2469,57	3169,54	3627,4	3998,45



Şekil 6.8: Farklı engel büyüklükleri için toplam rota uzunlukları.

Şekil 6.8’de, engel yarıçap değerinin artışı, ortamın engel doluluk oranını karesel olarak artırır. Farklı engel boyutları için engellerin merkezleri ve kılavuz noktalarının konumları değişmemektedir. Dairesel engellerin büyümesiyle, toplam mesafenin doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Daha büyük engel boyutlarında engellere takılmadan geçilebilen yerlerden, daha küçük engel boyutlarında da geçilebilmektedir. Aynı müşteri kurulumu için ortamdaki mevcut engellerin küçülmesiyle, toplam maliyet doğrusal bir biçimde azalmaktadır. “0” engel boyutunda (engel ve kılavuz noktası içermeyen ortam) tüm müşteriler doğrudan birbirini görebilirler. Bu nedenle, engel içeren ortam için kılavuz kullanımına geçişle birlikte (1 engel yarıçapında) aşırı bir mesafe artışı olmuştur.

7. ÇOKGENSEL ENGELLER İÇEREN ORTAMLARDA KÖŞE NOKTALARI KULLANILARAK KAPASİTELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ

Bu bölümde, ilk olarak, çokgensel engellere ilişkin yöntemle ait ayrıntılar, engellerle olan kesişme durumları-yaklaşımları ve kesişme algoritması ve bu bölüm ile ilgili çözüm verilmiştir. Daha sonra, bu bölüme ait deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen deneyler sunulmuştur.

7.1 Çokgensel Engeller İçeren Ortam

Çokgensel engeller içeren ortam, mevcut depo-müşteri konumları ve bu konumlar dışında yer alan farklı büyüklüklerdeki dışbükey çokgensel şekilleri içeren bir çalışma ortamıdır. Engeller, yaklaşım yapılmasına (dairesel engellere ilişkin yaklaşım için Bkz. Bölüm 6.1) gerek kalmadan, dışbükey çokgenler şeklinde modellenirler. Engel içeren ortamlara ilişkin diğer ayrıntılar 5. Bölüm’de verilmiştir (Bkz. Bölüm 5.1). Çokgensel engellere ilişkin kısıtlar ise şunlardır:

- Depo-müşteri konumları ve engeller dışında ayrıca kılavuz noktaları tanımlanmamakta ve üretilmemektedir.
- Engellere ait tüm köşeler kılavuz noktası görevi görmektedir.
- Bir engele ait ardışık köşe çifti arasında, o engelin bir kenarı boyunca (ilgili kenara teğet bir biçimde) hareket edilebilir.

7.2 Çokgensel Engeller için Ortama İlişkin Kesişmeler

Dairesel engeller için geliştirilen yöntem (Bkz. Bölüm 6.3), çokgensel engeller için genişletilmiştir. Dikkate alınan olası durumlar ise şunlardır:

- İki nokta arasındaki dolaşmanın;
 - Depo-müşteri konumları arasında olması
 - Bir engele ait köşe ile depo-müşteri konumu arasında olması
 - Aynı engel üzerindeki köşeler arasında olması

- *doğrudan hareket edilebilir*: engele ait ardışık köşe çifti (engelin herhangi bir kenarı)
- *doğrudan hareket edilemez*: engele ait ardışık olmayan köşe çifti (engelin herhangi bir köşegeni)
- Farklı engellere ait köşeler arasında olması

Kesişme durumlarını belirlemek amacıyla, bir çokgene ait her doğru parçasının tura ait olası bir doğru parçası ile olan şu durumları dikkate alınır:

- Kesişmeme : örtüşmeme veya paralel olma durumu
- Tek noktada kesişme : kesişme noktası çokgene ait bir köşe
- İki noktada kesişme : örtüşme durumu için çokgene ait;
 - *köşe olmaması* : diğer noktalar depo-müşteri konumları
 - *tek köşe olması* : diğer nokta depo-müşteri konumu
 - *iki köşe olması* : çokgene ait bir kenar ile çakışma

Herhangi bir nokta (depo-müşteri-köşe konumu) çifti arasındaki düz bir hattın, herhangi bir dışbükey çokgensel engelle kesişme durumunu belirlemek için geliştirilen algoritmanın sözde kodu Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1: İki nokta arasındaki potansiyel hat üzerindeki dışbükey çokgensel engelleri tespit eden sözde kod.

```

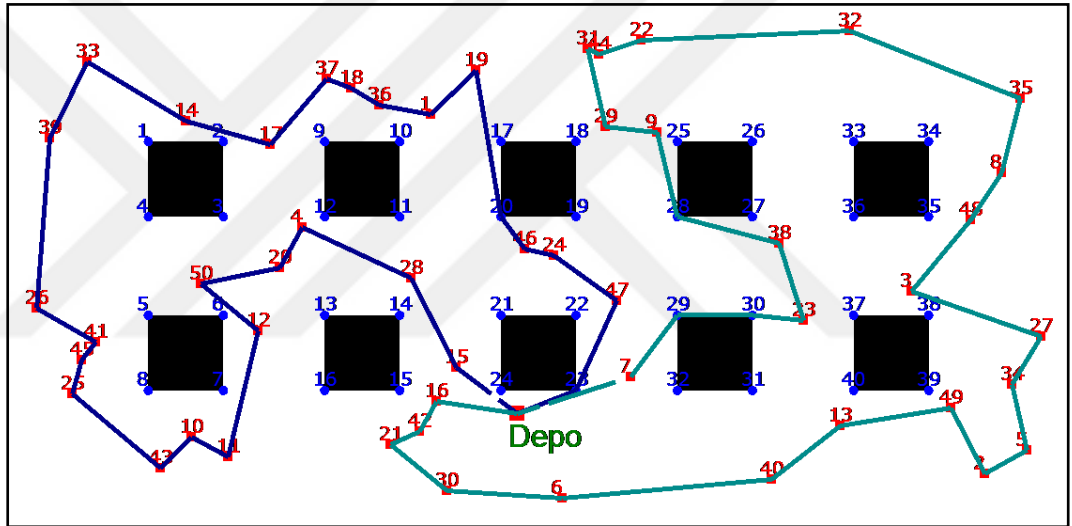
Algorithm: determinePolygonalObstaclesBetweenLocationPair(PointF point1, PointF point2)
1.  for mevcut engel : “ortamda tanımlı tüm engeller” do
2.      for mevcut kenar : “mevcut engele ait tüm kenarlar” do
3.          if “point1-point2 nokta çifti arasındaki potansiyel hat ile mevcut kenar kesişiyor” then
4.              return true           // bu iki nokta arasında doğrudan hareket edilemez
5.          end if
6.      end for
7.  end for
8.  return false           // kesişmeme durumu
  
```

Çizelge 7.1’de, sonuç *false* ise ilgili nokta çifti arasındaki uzaklık doğrudan hesaplanabilir; çünkü bu iki nokta arasında doğrudan hareket edilebilir. Dairelere göre (Bkz. Çizelge 6.1) tek fark ise nokta çifti arasındaki potansiyel hattın çokgene ait her kenar ile karşılaştırılmasıdır.

7.3 Çokgensel Engeller İçeren Ortamlar için Çözüm

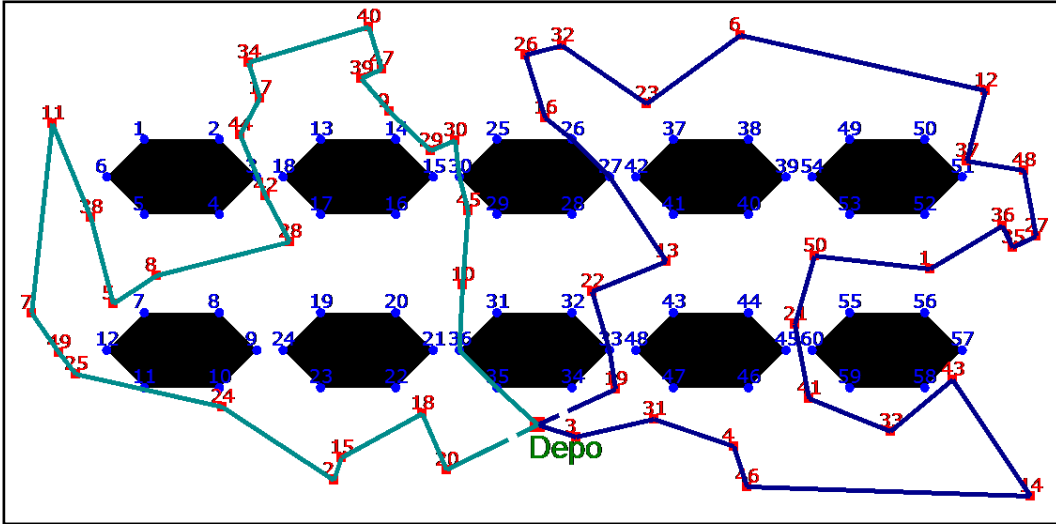
Bu çözümde, düğümler-arası dolaşmalar, çokgensel engeller dikkate alınarak ve köşe noktaları üzerinden gerçekleştirilir ve en uygun rota belirlenir.

Şekil 7.1’de ve Şekil 7.2’de, engellerin düzenli (belli büyüklüklerde) dışbükey çokgenler şeklinde tanımlandığı durumda CVRP için elde edilen örnek iki sonuç verilmiştir. Şekil 7.1’de, kare şeklindeki 10 (2×5) engel ortama düzenli aralıklarla dağıtılmıştır. Bu örnekte, rasgele bir depo ve 50 müşteri konumu ve 40 (10×4) engel köşesi mevcuttur. Her müşterinin talebi 10 birim ve araç kapasitesi 250 birimdir. 500 birimlik toplam talep ise iki rotada karşılanır.



Şekil 7.1: Karesel engeller içeren bir ortamda CVRP çözümü (iki rota için).

Şekil 7.2’de, altıgen şeklindeki 10 (2×5) engel ortama düzenli aralıklarla dağıtılmıştır. Bu örnekte, rasgele bir depo ve 50 müşteri konumu ve 60 (10×6) engel köşesi mevcuttur. Her müşterinin talebi 10 birim ve araç kapasitesi 250 birimdir. 500 birimlik toplam talep ise iki rotada karşılanır.



Şekil 7.2: Altıgensel engeller içeren bir ortamda CVRP çözümü (iki rota için).

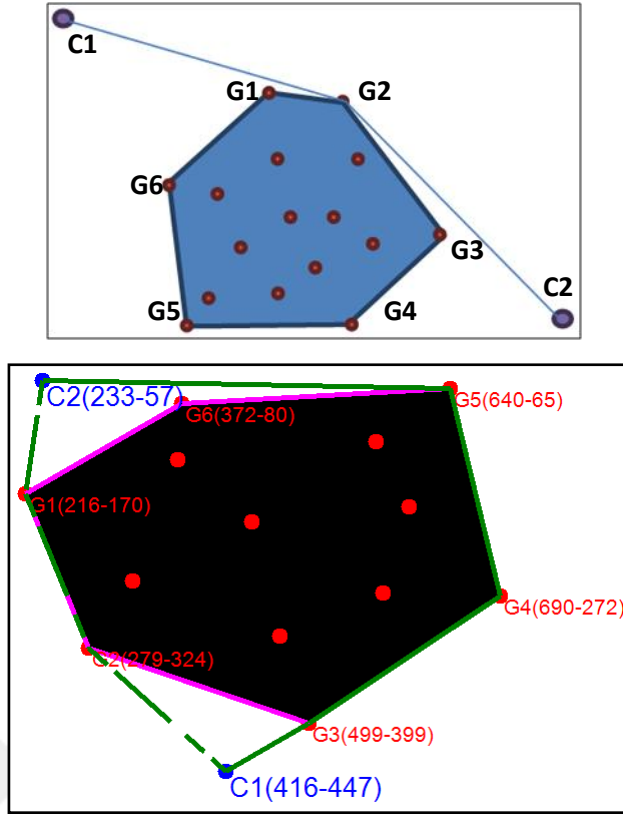
Şekil 7.1’de ve Şekil 7.2’de, birbirini doğrudan görmeyen konumlar arasındaki dolaşmalar köşe noktaları (küçük daireler) üzerinden gerçekleştirilir.

Basit bir grafiksel kullanıcı arayüzü ile dışbükey çokgensel engellerin tanımlanabilmesi ve ziyaret noktaları ile birlikte ortama eklenebilmesi için bir ara-program geliştirilmiştir. İlk olarak, verilen noktalar kümesinin (engellere ait köşe noktaları) dışbükey kabuğu (*convex-hull*) belirlenerek engeller oluşturulur. Daha sonra, müşteri konumları eklenir ve nokta çiftleri arasındaki dolaşmalar belirlenir.

Hesaplamalı geometri alanında çalışılan önemli bir problem olan *dışbükey kabuk algoritması*¹, verilen noktalar kümesini örten kümeyi bulmayı amaçlar. Dışbükey kabuk oluşturulurken, bu kümeye dâhil herhangi iki nokta arasındaki potansiyel hat, elde edilen çokgensel *engel içerisinde*² kalmalıdır. Şekil 7.3(a)’daki örnekte, dışbükey kabuk dışında bulunan C1-C2 konumları arasındaki hareket için bu kabuk üzerindeki G2 kılavuz noktası kullanılmıştır.

¹ Dışbükey kabuk algoritması, coğrafi bilgi sistemlerinde, robotbilim alanında ve üç-boyutlu oyunlarda çarpışma tespitinde kullanılmaktadır.

² Şekil üzerinden seçilen herhangi iki nokta arasındaki potansiyel hattın herhangi bir kısmı şeklin dışında kalıyorsa, şekil *içbükey* olarak değerlendirilir.



Şekil 7.3: (a) dışbükey kabuk oluşturma ve en kısa yolu bulma örneği ve (b) iki nokta arasında, engelle ait köşeler üzerinden hareket edilmesi.

Dışbükey kabuğun oluşturulması için geliştirilen program (mevcut bir dışbükey kabuk bulma algoritmasından (CodeProject, 2008) uyarlanmıştır) kullanılarak, form üzerinde n tane nokta girilir. Bu noktaların dışbükey kabuğu oluşturulur ve şeklin içi doldurularak engel elde edilir. Daha sonra, iki nokta eklenir ve bu noktalar arasındaki en kısa yol, noktalar arasındaki potansiyel hat üzerinde engel yoksa doğrudan, diğer durumda ise mevcut engelle ait köşeler üzerinden belirlenir. Şekil 7.3(b)'deki örnekte, $C1$ - $C2$ müşteri çifti arasındaki, $G1$ ve $G2$ köşe noktalarından geçen, en kısa yol kesikli çizgilerle gösterilmiştir.

7.4 Çokgensel Engeller İçeren Ortamlar için Deneysel Çalışmalar

Bu alt bölümde, dışbükey çokgensel engellerin yerleştirilmesi ile ilgili ayrıntılara ve farklı durumlar için gerçekleştirilen deneylere yer verilmiştir (veri kümesi ve deneysel kurulum ile ilgili bilgiler için Bkz. Bölüm 6.4.1, engel içermeyen ortamlara ilişkin deneyler ve GA tabanlı yöntemin başarımı için Bkz. Bölüm 6.4.2.).

7.4.1 Çokgensel engellerin yerleştirilmesi

Dairesel engeller içeren ortamlarda CVRP çözümü için geliştirilen yöntemin sözde kodu (Bkz. Çizelge 6.7), çokgensel engeller içeren ortamlarda CVRP çözümü için de geçerlidir. Tek fark, engellerin oluşturulmasıyla kılavuz noktalarının (engellere ait köşeler) da elde edilmesidir. Bu nedenle, Çizelge 6.7'deki *ikinci* adım işletilmez. *Birinci* adımdaki *createCircularObstacles* metodu ise daireler için merkez noktası ve yarıçap değerinin iki katı, sırasıyla, kareler ve altıgenler için ağırlık merkezi ve kenar uzunluğu olacak şekilde uygulanır.

Depo-müşteri konumları olarak, engeller dışındaki alanlar kullanılır. Bu nedenle ortama, ilk olarak engeller, daha sonra, bir noktanın bir çokgen içerisinde yer alması durumu ele alınarak, depo-müşteri konumları eklenir.

Çokgensel engeller içeren ortamlara ilişkin deneyler, daireler yerine kareler ve altıgenler kullanılarak ve daireli engeller içeren ortamlara ilişkin deneylere (kullanılan terimler için Bkz. Çizelge 6.8) benzer şekilde gerçekleştirilir.

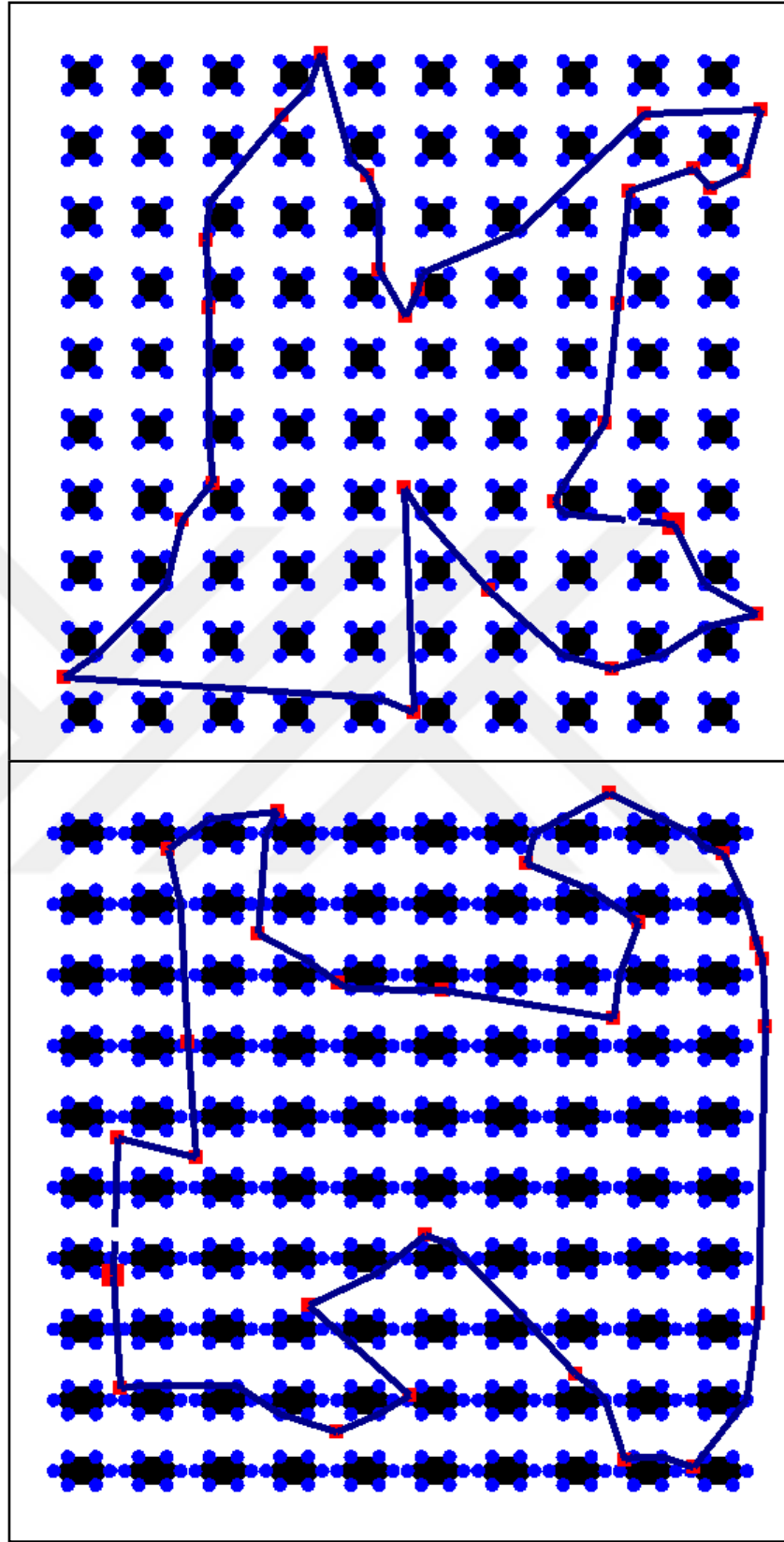
Deneylere ilişkin çizelgeler ve grafikler, ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

7.4.2 Farklı müşteri sayıları için deneyler

Bu deneyler, Bölüm 6.4.4'teki deneylere benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. İlgili kurulumla ilişkin bilgiler Çizelge 7.2'de, örnek bir ekran görüntüsü Şekil 7.4'te, sonuçlar ise Çizelge 7.3'te ve Şekil 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.2: Müşteri sayısının değişimi deneylerine ait kurulum.

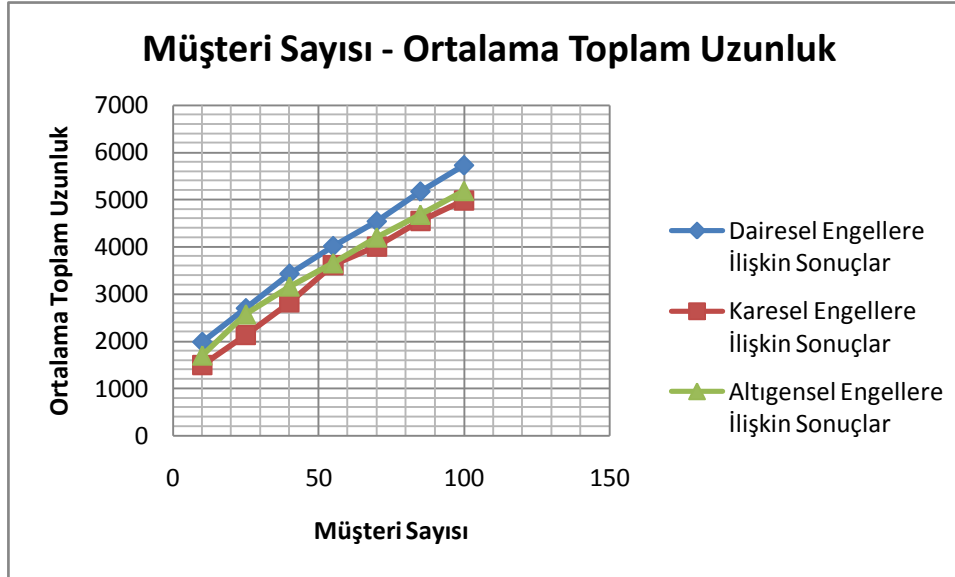
Engel Türü	Kılavuz Sayısı	Engel Büyüklüğü	Engel Doluluğu
Dairesel	121	10 (yarıçap değeri)	%10,24
Karesel	400	20 (kenar uzunluğu)	%13,03
Altıgensel	600	20 (kenar uzunluğu)	%19,55



Şekil 7.4: Ortamda 25 müşteri, 100 engel ve (a) kareler için 400 ve (b) altıgenler için 600 kılavuz noktası mevcut olup; tüm talepler tek rotada karşılanmaktadır.

Çizelge 7.3: Sabit engel sayısı-büyüklüğü ile müşteri sayısının değişimi.

CC		10	25	40	55	70	85	100
RC		1	1	2	3	3	4	4
DAİRESEL								
TL	Avg	1981	2696	3429	4015	4540,2	5172,7	5728,6
	SD	0	0	0	0	4,94	59,68	25,21
GR	Avg	1,1	10,3	37,8	29,5	59,7	73,1	80,9
	SD	0,3	25,26	21,2	19,8	22,08	20,73	9,4
RT	Avg	1,4	49,4	355,4	585,7	1899,7	3731,5	5762,9
	SD	4,2	104,3	186,39	356,59	583,07	875,34	622,81
KARESEL								
TL	Avg	1492	2135	2824	3614,6	4010,2	4555,9	4984,8
	SD	0	0	0	2,91	14,19	11,64	56,36
GR	Avg	1,7	22,3	12,7	44,2	57,2	61,3	95,8
	SD	0,78	21,1	9,18	34,11	26,78	23,47	3,4
RT	Avg	7,7	111,3	141,8	807,3	1671,7	3119,8	6605
	SD	7,73	84,5	88,42	546,79	649,17	963,81	555,87
ALTIGENSEL								
TL	Avg	1698	2570	3161	3652,9	4199,8	4680,5	5183,8
	SD	0	0	0	3,01	6,13	24,63	33,39
GR	Avg	1,8	4	35,7	58,8	72,2	77,2	83,6
	SD	0,75	4	28,44	25,9	17,69	14,88	15,02
RT	Avg	9,2	23,2	346,1	1046,5	2281,4	3773,4	6105,5
	SD	7,57	23,55	236,4	417,86	525,14	744,71	1131,47



Şekil 7.5: Farklı müşteri sayıları için toplam rota uzunlukları.

Şekil 7.5'te, müşteri sayısının artmasıyla, karmaşıklığın ve toplam mesafenin doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Her engel türü deneyinde, aynı

engel kurulumu için ortamdaki mevcut müşteri konumlarının azalmasıyla, toplam maliyet doğrusal bir biçimde azalmaktadır. Karesel ve altıgensel engellere ilişkin sonuçlar, ortamda ek kılavuz noktalarının olmamasına bağlı olarak, dairesel engellere ilişkin sonuçlara göre daha başarılıdır. Toplam mesafeler her müşteri sayısı için daha kısadır. Altıgensel engeller karesel engellere göre ortamda daha fazla (bir buçuk kat) yer kaplarlar ve altıgensel engeller için ortamdaki geçilebilecek alan miktarı daha azdır. Ayrıca, ortamda daha fazla sayıda köşe noktası (bir buçuk kat) mevcut olduğu için çok daha fazla ve farklı yol alternatifi söz konusudur. Bu nedenle, altıgensel engellere ilişkin toplam mesafeler karesel engellere ilişkin toplam mesafelere göre daha uzundur. Farklı yol alternatiflerinin oluşmasına bağlı olarak, kısmen olumlu yönde etki gözlemlenebilmektedir.

7.4.3 Ortamın farklı engel doluluk oranları için deneyler

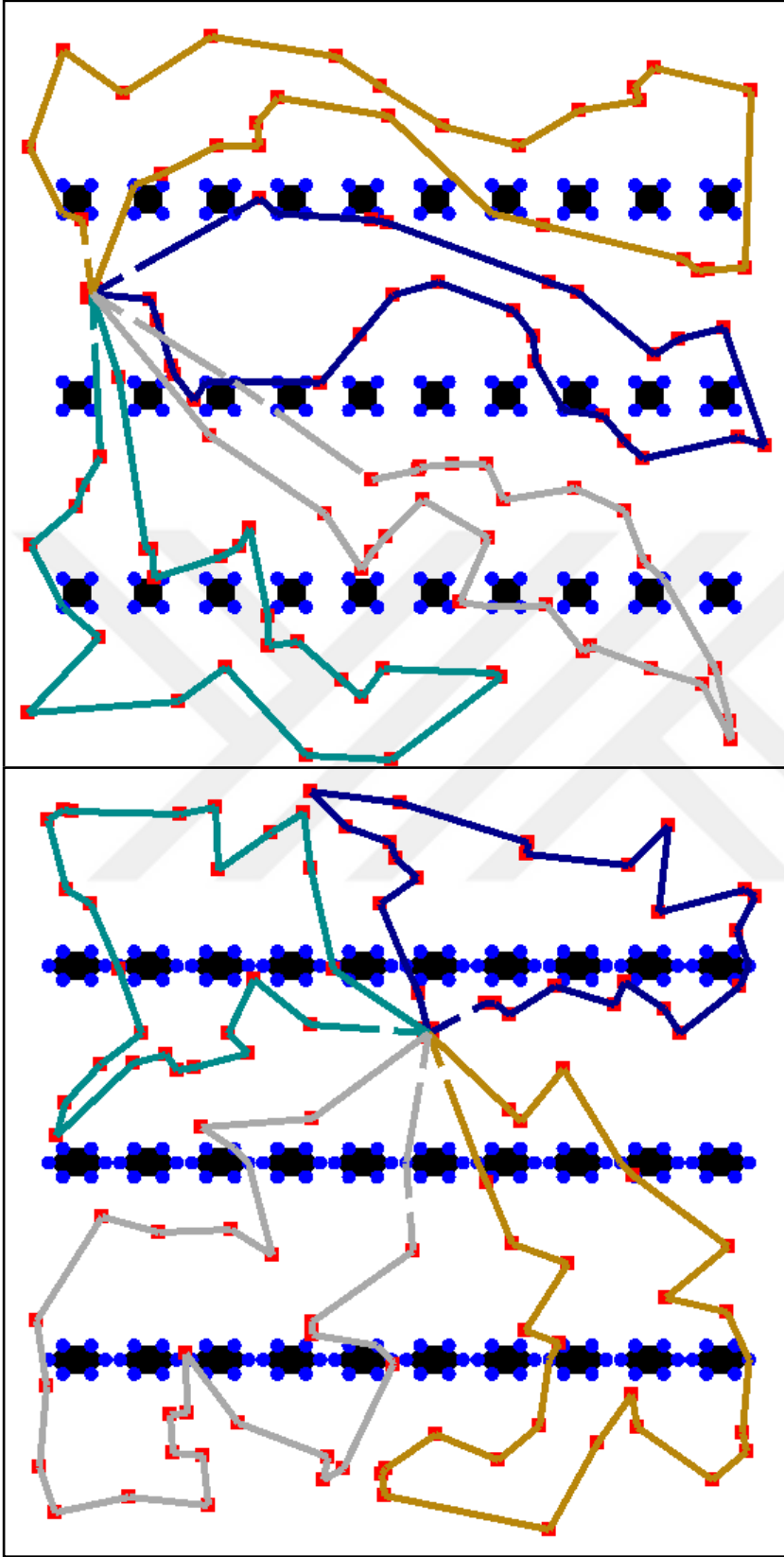
Bu kapsamda, müşteri sayısı 100 olacak şekilde, hem farklı engel sayıları hem de farklı engel büyüklükleri temel alınmıştır.

Farklı engel sayıları için deneyler

Bu deneyler, Bölüm 6.4.5'teki ilk alt bölümdeki deneylere benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. İlgili kurulumla ilişkin bilgiler Çizelge 7.4'te, örnek bir ekran görüntüsü Şekil 7.6'da, sonuçlar ise Çizelge 7.5'te ve Şekil 7.7'de verilmiştir.

Çizelge 7.4: Engel sayısının değişimi deneylerine ait kurulum.

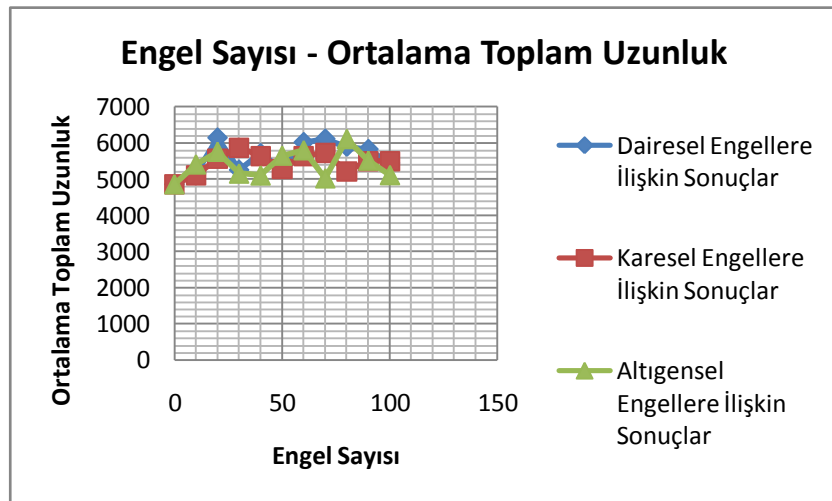
Engel Türü	Engel Büyüklüğü
Dairesel	10 (yarıçap değeri)
Karesel	20 (kenar uzunluğu)
Altıgensel	20 (kenar uzunluğu)



Şekil 7.6: Ortamda 100 müşteri, 30 (3×10) engel ve (a) kareler için 120 ve (b) altıgenler için 180 kılavuz noktası mevcut olup; tüm talepler dört rotada karşılanmaktadır.

Çizelge 7.5: Sabit müşteri sayısı ve engel büyüklüğü ile engel sayısının değişimi.

OC		X	1 x 10	2 x 10	3 x 10	4 x 10	5 x 10	6 x 10	7 x 10	8 x 10	9 x 10	10 x 10
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
DAİRESEL												
GC		0	22	33	44	55	66	77	88	99	110	121
OFR		0	1,02	2,05	3,07	4,09	5,12	6,14	7,17	8,19	9,21	10,24
TL	Avg	4863,9	5174,9	6144,5	5258,3	5715,8	5281,2	6018,7	6113,9	5898,2	5828,5	5447,9
	SD	34,57	33,27	56,91	130,05	29,42	52,32	47,6	48,17	39,81	26,65	91,03
GR	Avg	85	84,3	87,2	82,9	78,1	86,6	72,9	83,9	81,5	88,4	91,7
	SD	11,97	16,26	15,31	16,69	19,45	11,64	18,79	13,08	18,22	9,07	6,03
RT	Avg	6608,8	6018	7020,8	5787,4	6506,8	6204	6094,8	6119,1	5915,2	6629	6959,8
	SD	732,48	902,24	1170,6	1070,84	1425,56	542,79	1150,55	1101,82	1201,11	576,71	433,17
KARESEL												
GC		0	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400
OFR		0	1,30	2,61	3,91	5,21	6,52	7,82	9,12	10,43	11,73	13,03
TL	Avg	4863,9	5111,8	5574,5	5873,9	5642,1	5293,6	5636,8	5725,3	5212,1	5507	5495
	SD	34,57	51,08	50,86	25,13	23,88	89,54	56,94	63,45	62,74	57,83	37,82
GR	Avg	85	84,6	83	89,8	83,1	82	91,7	76,3	89,1	86	83,4
	SD	11,97	12,69	19,02	6,26	12,15	15	6,42	22,97	7,22	10,6	8,72
RT	Avg	6608,8	5935,9	6185,7	7577,7	6600,7	6114,9	7566,1	6401	6064,2	6599,5	6525,8
	SD	732,48	742,22	1362,41	839,42	529,75	945,9	825,03	1505,32	461,56	738,13	474,88
ALTIGENSEL												
GC		0	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
OFR		0	1,95	3,91	5,86	7,82	9,77	11,73	13,68	15,64	17,59	19,55
TL	Avg	4863,9	5411	5759,3	5159,4	5108,1	5653,4	5800,4	5028,3	6109,8	5516	5116,9
	SD	34,57	35,81	44,47	77,84	84,58	20,49	74,82	30,9	46,35	52,13	72,48
GR	Avg	85	85,5	73,9	77,8	78,4	85,4	84,4	79,9	74,2	84	86,4
	SD	11,97	15,81	20,3	18,09	17,25	17,88	7,46	18,11	15,63	10,41	12,41
RT	Avg	6608,8	6464	5713,5	5862,5	6215,8	6600,8	7118,9	6036,2	6203,1	6094,8	5921,1
	SD	732,48	945,66	1314,8	1012,41	1162,81	1252,74	641,83	1099,63	884,02	913,57	759,98



Şekil 7.7: Farklı engel sayıları için toplam rota uzunlukları.

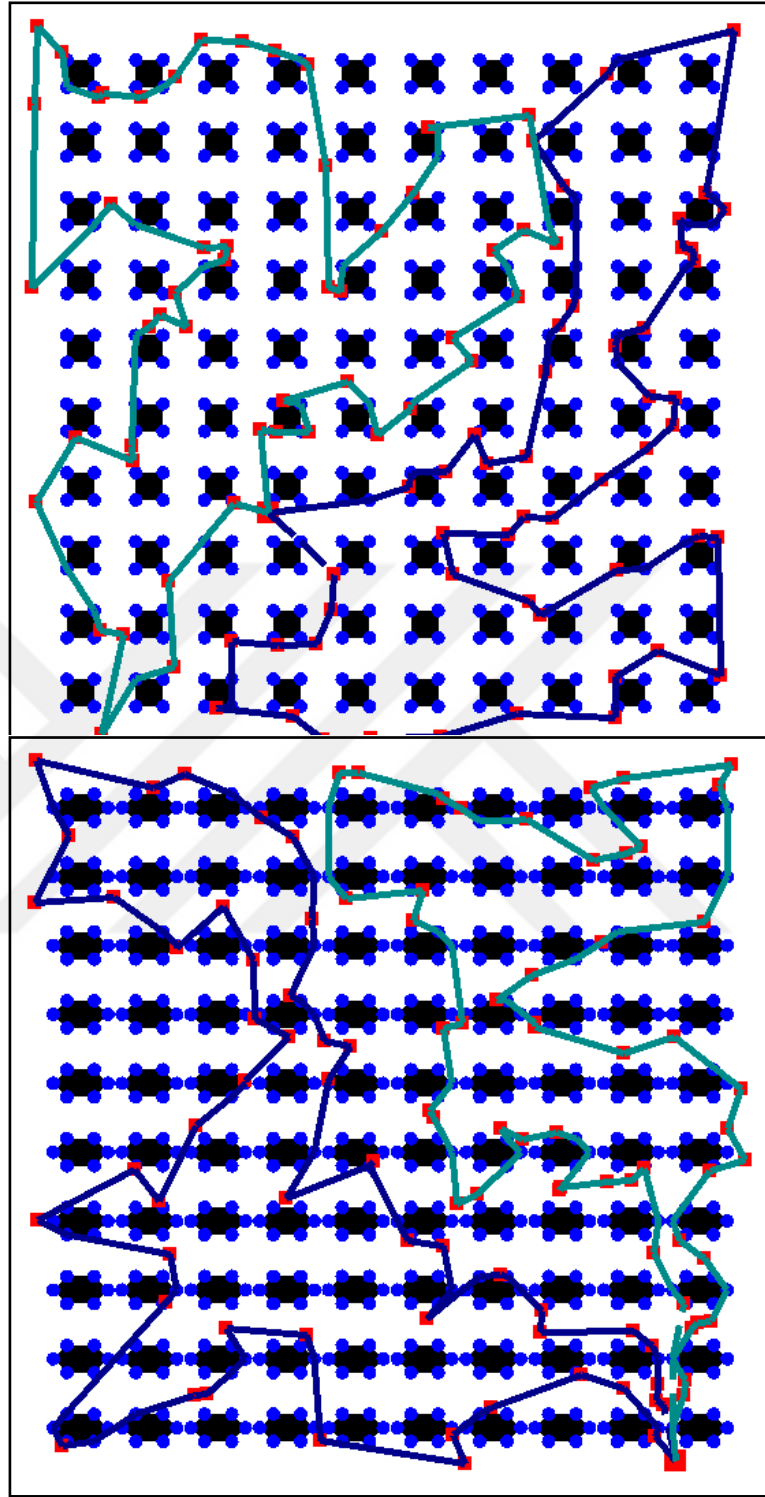
Şekil 7.7’de, engel sayısının artmasıyla, karmaşıklık büyük ölçüde artar. Toplam mesafe ise hem artış hem de azalma gösterebilmektedir. Engel sayıları değiştiğinde, engellerin yerleri de değişmektedir. Bu nedenle, tüm engel sayısı deneyleri için müşteriler ortak noktalara yerleştirilememektedir ve bu deneylerde sabit konumlardaki belli bir müşteri kümesi kullanılmamıştır. Her engel türü için engel sayısının artışı, kılavuz noktalarını ve doğal olarak da yol alternatiflerini artırır ve bu nedenle toplam mesafe azalabilir. Örneğin kılavuz noktalarındaki artış, grafiğin sonunda toplam mesafenin azalmasına neden olmuştur.

Farklı engel büyüklükleri için deneyler

Bu deneyler, Bölüm 6.4.5’teki ikinci alt bölümdeki deneylere benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. İlgili kurulumla ilişkin bilgiler Çizelge 7.6’da, örnek bir ekran görüntüsü Şekil 7.8’de, sonuçlar ise Çizelge 7.7’de ve Şekil 7.9’da verilmiştir.

Çizelge 7.6: Engel büyüklüğünün değişimi deneylerine ait kurulum.

Kılavuz Sayısı	Engel Türü
121	Dairesel
400	Karesel
600	Altıgensel

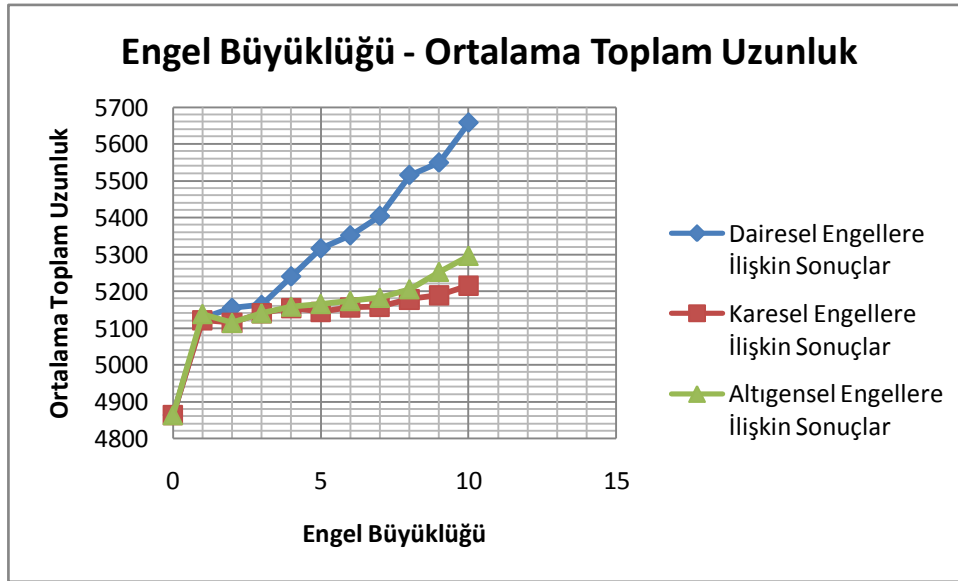


Şekil 7.8: Ortamda 100 müşteri, 100 engel ve (a) kareler için 400 ve (b) altıgenler için 600 kılavuz noktası mevcut olup; tüm talepler iki rotada karşılanmaktadır.

Şekil 7.8’de, araç kapasitesi 500 birim, engel kenar uzunluğu ise 20’dir.

Çizelge 7.7: Sabit müşteri ve engel sayıları ile engel büyüklüğünün değişimi.

OS		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DAİRESEL												
OFR		0	0,10	0,41	0,92	1,64	2,56	3,68	5,02	6,55	8,29	10,24
TL	Avg	4863,9	5127,5	5154,3	5162,4	5239,9	5315,9	5351,4	5403,9	5515,1	5548,8	5657,4
	SD	34,57	25,17	27,63	17,52	24,01	21,98	15,08	20,67	35,57	26,6	41,44
GR	Avg	85	526	482,8	618,8	504,3	420,7	570,2	647,2	536,6	734,4	479
	SD	11,97	261,67	273,68	293,97	243,38	257,06	260,42	236	245,52	206,77	194,6
RT	Avg	6608,8	62895,6	61126,7	63413,2	64833,9	60147	61283,4	59522,8	61381,7	59529,4	61816,1
	SD	732,48	3679,75	3016,79	2286,31	2301,07	4298,14	3201,89	2469,57	3169,54	3627,4	3998,45
KARESEL												
OFR		0	0,13	0,52	1,17	2,09	3,26	4,69	6,39	8,34	10,56	13,03
TL	Avg	4863,9	5121,8	5114,7	5139,8	5153,7	5144,4	5155,5	5157,6	5178	5189,4	5215,2
	SD	34,57	30,46	25,91	25,19	41,34	38,27	23,33	26,16	40,18	33,98	36,9
GR	Avg	85	499,7	500,6	560,3	557	677,9	626	848,6	598,4	617,3	553,5
	SD	11,97	236,73	230,04	219,32	201,56	253,16	229,64	157,53	234,71	277,48	218,97
RT	Avg	6608,8	64123,6	63428,9	61150,8	62144,3	62145	63949,4	62184,4	62597,7	62564,8	63596,8
	SD	732,48	2338,55	2077,74	3359,21	2376,62	3381,91	2847,17	4443,6	3890,8	5213,09	2015,14
ALTIGENSEL												
OFR		0	0,20	0,78	1,76	3,13	4,89	7,04	9,58	12,51	15,83	19,55
TL	Avg	4863,9	5138,3	5114,2	5140,4	5158,4	5165,6	5173,6	5182,3	5205,6	5252,8	5296,3
	SD	34,57	31,1	30,88	31,96	26,3	25,48	25,73	31,76	30,77	13,64	14,81
GR	Avg	85	578,2	709,1	610,1	606,2	555,1	518,8	530	768,6	581,3	458,6
	SD	11,97	227,76	228,73	220,83	183,09	184	225,59	274,84	253,69	183,72	209,32
RT	Avg	6608,8	63346,9	64522,1	61465,7	63298,2	62952,6	63189,9	63933	65825,8	60635,4	64890,9
	SD	732,48	2439,9	2428,8	3328,91	3403,27	6963,92	3424,03	3583,49	4866,26	5372,82	2263,96



Şekil 7.9: Farklı engel büyüklükleri için toplam rota uzunlukları.

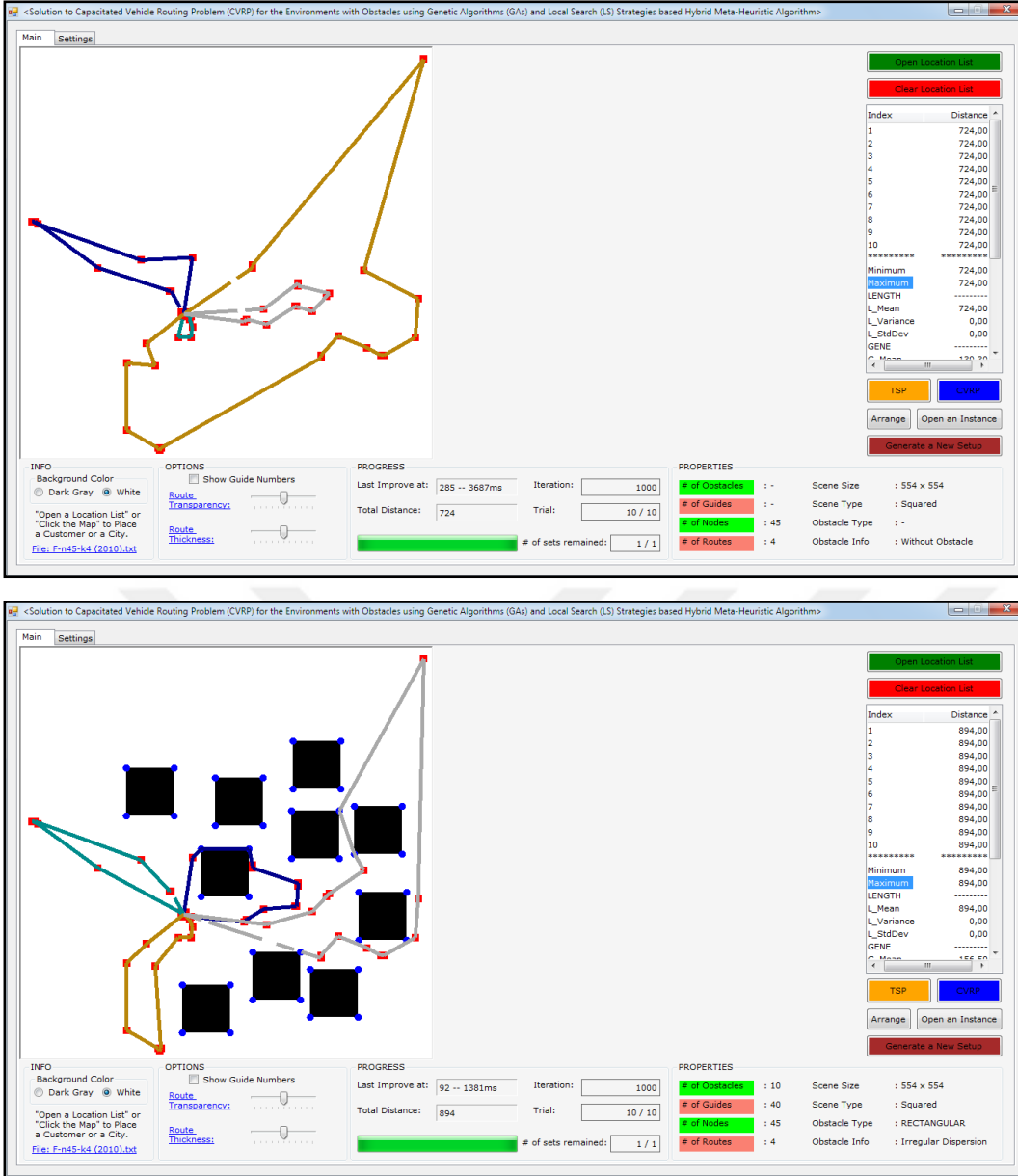
Şekil 7.9’da, engel yarıçap değerinin (veya kenar uzunluğunun) artışı, ortamın engel doluluk oranını karesel olarak artırır. Farklı engel boyutları için engellerin merkezleri ve kılavuz noktalarının konumları değişmemektedir. Dairesel engellerin büyümesiyle, toplam mesafenin doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Daha büyük engel boyutlarında engellere takılmadan geçilebilen yerlerden, daha küçük engel boyutlarında da geçilebilmektedir. Öte yandan, karesel ve altıgensel engellerin büyümesiyle, toplam mesafenin genel olarak doğrusal bir biçimde arttığı; fakat bazı engel büyüklükleri için azalabildiği (kareler için “1-2” ve “4-5” aralıklarında, altıgenler için “1-2” aralığında) gözlemlenmiştir. Aynı müşteri kurulumu için ortamdaki mevcut engellerin küçülmesiyle, toplam maliyet doğrusal bir biçimde azalmaktadır. “0” engel boyutunda (engel ve kılavuz noktası içermeyen ortam) tüm müşteriler doğrudan birbirini görebilirler. Bu nedenle, her engel türü deneyinde, engel içeren ortam için kılavuz kullanımına geçişle birlikte (daireler için 1 engel yarıçapında, çokgenler için 2 engel kenar uzunluğunda) aşırı bir mesafe artışı olmuştur.

7.4.4 VRPLIB örneği üzerinde düzensiz engel yerleşimi için deneyler

Düzenli engel yerleşimi (Bkz. Bölüm 7.4.2 ve Bölüm 7.4.3) dışında, VRPLIB depo-müşteri konumları için rastgele engel yerleşimlerine ilişkin deneylerde, ilk olarak, VRPLIB kütüphanesinde yer alan ilgili problem örneğine ait depo-müşteri konumları ortama yerleştirilir. Daha sonra, engeller ortama, bu konumlar dışındaki alanlara, iki farklı şekilde yerleştirilirler: (1) rastgele veya (2) kullanıcı tarafından oluşturularak. *F-n45-k4* problem örneğinin (Bkz. Çizelge 6.4) temel alındığı bu deneyler, bilinen en-iyi-çözümünden ne kadar sapma olduğunu göstermek açısından oldukça önemlidir. İlgili talep miktarları ve araç kapasitesi kullanılarak, 44 müşteri için tüm talepler dört rotada karşılanmaktadır.

Düzensiz konumlarda karesel engeller

Bu deney (Şekil 7.10), rastgele oluşturulan ve kenar uzunluğu 64 olan 10 adet karesel engel ortamdaki boş alanlara yerleştirilerek (Şekil 7.10(b)); herhangi bir değişiklik yapılmadan 10 kez yinelenmiştir.



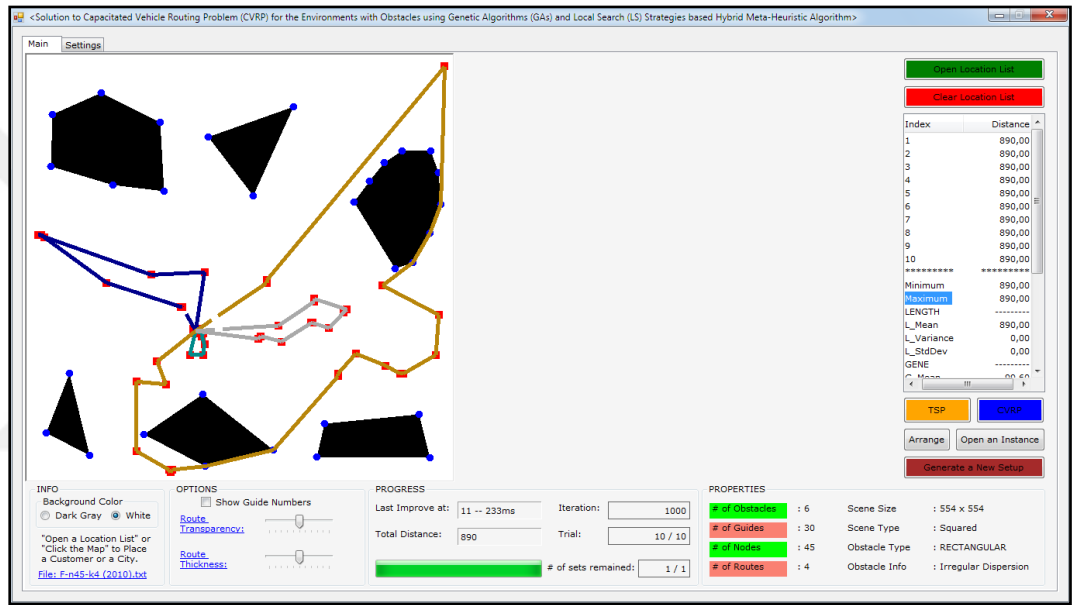
Şekil 7.10: Engel içeren-içermeyen ortamlara ilişkin çözümdeki değişim: (a) engel içermeyen ve (b) engel içeren aynı ortamda deney.

Şekil 7.10'da, engel içermeyen ortamdaki toplam mesafe 724 iken, engel içeren ortamdaki toplam mesafe ise 894'tür. Bu mesafe farkının ise ortamda yeterince büyük karesel engellerin (40 adet kılavuz mevcuttur) olmasından kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Bazı CVRP örnekleri için örneğe ait konumlar, oldukça küçük bir alanda ortama dağılmakta, ayrıca negatif ve/veya çalışma ortamının boyutlarından daha büyük değerler içerebilmektedirler. Bu nedenle ilgili konumlar, normalleştirilirler ve çalışma ortamında daha geniş bir şekilde yer alacak şekilde ortama yerleştirilirler (Şekil 7.10). Hesaplamalarda ise ilgili örneğe

ait depo-müşteri konumlarına ilişkin gerçek değerler kullanılır. Ayrıca, engeller normalleştirilmiş duruma göre ortama eklendiği için toplam mesafe normalleştirme değerine göre güncellenir.

Düzensiz konumlarda dışbükey çokgensel engeller

Bu deney (Şekil 7.11), kullanıcı tarafından oluşturulan ve her biri farklı kenar uzunluklarına sahip altı adet dışbükey çokgensel engel ortamdaki boş alanlara yerleştirilerek; herhangi bir değişiklik yapılmadan 10 kez yinelenmiştir.



Şekil 7.11: Engel içeren ortama ilişkin çözümdeki değişim.

Şekil 7.11’de, engel içeren ortamdaki toplam mesafe 890’dır. Bu mesafe farkının ise ortamda yeterince büyük çokgensel engellerin (30 adet kılavuz mevcuttur) olmasından kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Depo-müşteri konumlarına ek olarak, benzetim ortamına eklenen her nokta kümesi için ilgili dışbükey kabuk oluşturularak (geliştirilen ara programa ilişkin arayüz için Bkz. Şekil 7.3(b)), en az üç kenar içeren üçgen, dörtgen, beşgen, altıgen vb. şeklindeki çeşitli dışbükey çokgensel engeller tanımlanabilmektedir. Şekil 7.11’de görüldüğü gibi, engeller ortama düzensiz bir biçimde (rastgele konumlarda ve büyüklüklerde olacak şekilde) yerleştirilebilmekte ve düzensiz engel kurulumlarında da en kısa toplam mesafelere sahip en uygun rotalar belirlenebilmektedir.

8. BULGULAR

İlk olarak, CVRP çözümü için geliştirilen melez meta-sezgisel algoritma, engel içermeyen ortamlarda ve literatürdeki bazı CVRP örnekleri üzerinde işletilmiş ve her örnek için bilinen en iyi değerler (literatürde raporlanmış minimum rota sayıları ve en kısa toplam mesafeler için Bkz. Çizelge 6.4) elde edilmiştir. GA tabanlı yöntemin başarımı gösterildikten sonra, geliştirilen yöntemi engel içeren ortamlarda test etmek amacıyla, engellerin ortama düzenli ve düzensiz bir biçimde yerleştirildikleri iki farklı durum ele alınmıştır. Engellerin konumlarını, sayısını ve büyüklüklerini (farklı engel kurulumları) ve ziyaret edilecek depo-müşteri konumlarını ayarlayarak, farklı nokta kümeleri üzerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. Önerilen yöntemlerle, hem daireler hem de kare ve altıgen şeklindeki (ve ayrıca düzensiz şekillerdeki) dışbükey çokgenler için başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tez çalışması kapsamındaki deneysel çalışmalarla elde edilen bulgular ise şunlardır:

- **Geliştirilen algoritma**
 - Genetik algoritma değişkenleri için uygun değerlerin belirlenmesi ve başlangıç nüfusun zeki bir yöntem kullanılarak üretilmesiyle, hızlı bir biçimde yakınsama gerçekleştiği ve oldukça iyi sonuçlar sağlandığı gözlemlenmiştir.
 - Yerel arama stratejilerinin nesiller boyunca uygulanması ve arama uzayının verimli bir biçimde taranmasıyla, algoritma başarımı oldukça artmış ve çok kısa sürelerde yakınsama sağlanabilmiştir.
- **Önerilen çözüm**
 - Kılavuz noktaları üzerinden belirlenen en uygun rota-güzergâhları ve konum bilgileri, gerekli araç sayısı ve minimum maliyet, tüm deneyler için çok küçük nesil değerleri (100 nesil tekrarı yeterli olabilmektedir) ile elde edilmiştir.
 - Genelleştirilen çözümde, yeni rotaların, ara-çözüm için tanımlanan ek kılavuz noktaları yerine engellere ait köşe noktaları üzerinden belirlenmesi, toplam mesafeleri büyük ölçüde azaltmıştır.

- Dairesel engeller içeren ortamlar için kılavuz engele uzaksa, daha uzun güzergâhlar ve daha büyük toplam maliyetler; çokgensel engeller içeren ortamlar için müşteri engele yakınsa, daha kısa güzergâhlar ve daha küçük toplam maliyetler söz konusu olabilmektedir.
- Engel büyüklüğü ve engel köşe sayısı, çoğu durumda, engel sayısına göre toplam mesafelerde daha büyük farklılıklara neden olabilmektedir. Bu bulguda, farklılık yaratacak çok sayıda durum söz konusudur: örneğin (1) engeller özdeş olmayabilirler ve (2) ortamda belli düzende yer almayabilirler (depo-müşteri konumlarına göre oluşturuldukları durum için).
- Belirlenen herhangi bir turu daha da kısaltabilmek için engellere daha yakın hareket edilebilir. Köşe noktalarının kullanımı ve çözümün eniyilemesi, sonuç güzergâhlara ait uzunlukların minimum veya minimuma-yakın olmasını garantilemektedir.
- **Deneyisel çalışmalar**
 - Müşteri sayısının artması, toplam yol maliyetini artırmaktadır.
 - Müşteri veya engel sayısının artması, işlem sayısını büyük ölçüde artırmaktadır; çünkü çözüm yönteminde, her müşteri çifti ile tüm kılavuz noktaları arasındaki durumlar dikkate alınır.
 - Engel sayısının veya büyüklüğünün artmasıyla, ortamdaki mevcut boş alan azalır; müşterilere engellerin çevresindeki diğer müşteriler üzerinden ulaşılması mümkün olmayabilir ve toplam yol uzunluğu artabilir.
 - Farklı müşteri yerleşimlerine bağlı olarak, engel sayısının değişimine ilişkin deneyler karşılaştırılabilir çıktılar sunmamaktadır (Bkz. Bölüm 6.4.5 ve Bölüm 7.4.3).

VRP türü problemlerin çözümünde, probleme-özel yöntemlerin kullanılması çok önemlidir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen GA tabanlı aramanın yerel arama stratejileri ile desteklenmesine dayalı melez yöntemin, en iyi değere hızlı yakınsadığı ve başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir.

9. SONUÇ VE TARTIŞMA

Tez çalışmasında, *dağıtım ağlarının eniyilemesi* problemi olarak CVRP çalışılmıştır. Bu kapsamda, CVRP'nin henüz literatürde incelenmemiş; fakat gerçek hayatta karşılaşılan özel bir durumu olan *engel içeren ortamlarda çözümü* ele alınmıştır. Bu amaçla, dışbükey çokgensel engeller içeren ortamlar için probleme en-uygun-çözümlerin nasıl sağlanabileceği incelenmiştir. Problem tanımlanmış ve çözüm için bir model oluşturulmuştur. Depo-müşteri konumları arasındaki dolaşmalar için iki çözüm yöntemi geliştirilmiştir: dolaşmalar, (1) dairesel engeller içeren ortama ilişkin ilk çözümde, engellere belli uzaklıklardaki ve ortamda belli düzende yer alan kılavuz noktaları üzerinden ve (2) dışbükey çokgensel engeller içeren ortama ilişkin ikinci çözümde ise çokgensel engellere ait köşe noktaları üzerinden gerçekleştirilir.

Her nokta çifti arasındaki potansiyel hat ile mevcut engellerin kesişme durumları dikkate alınarak, nokta çiftleri arasındaki en kısa uzaklıklar hesaplanır ve ilgili güzergâhlar belirlenir. Problemin klasik CVRP'ye dönüştürülmesiyle, bu yeni bilgiler kullanılarak, geliştirilen GA ve yerel arama tabanlı melez yöntem çözüm için uygulanır. En uygun rota kümesi ve minimum maliyet belirlenir ve sonuçlar sunulur.

Depo-müşteri konumlarının eklenebildiği, dairesel-çokgensel engellerin oluşturulup yerleştirilebildiği ve değişkenlerin kolaylıkla belirlenebildiği iki-boyutlu görsel bir benzetim ortamı (Ek 1, Ek 2 ve Ek 3) geliştirilmiştir. Güzergâhları kolaylıkla ayırt edebilmek ve rotalar üzerindeki kesişmeleri görebilmek amacıyla, her rota farklı bir renkle gösterilmektedir.

Önerilen çözümün doğruluğunu ve uygulanabilirliğini belirlemek amacıyla, geliştirilen melez meta-sezgisel algoritma iki şekilde test edilmiştir: (1) düzenli engel yerleşimlerinde, ortamın farklı engel doluluk oranlarıyla, farklı müşteri, engel sayıları ve engel büyüklükleri için ve (2) düzensiz engel yerleşimlerinde, literatürdeki mevcut CVRP örnekleri kullanılarak oluşturulan, farklı boyut ve konumlardaki rastgele engeller için. Tüm deneylerde, kısa işletim süreleri ile uygun çözümler elde edilebilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Gerçek-dünya uygulamalarında, çalışma ortamları engeller içerebilirler. Örneğin araçların veya dağıtıcıların geçemeyecekleri alanlar olabilir. Bu durum ise bu alanların engel olarak dikkate alınmasını gerektirir. Tez çalışması kapsamında önerilen çözüm yöntemi kullanılarak, CVRP'yi benzer ortamlara uyarlamak mümkün olabilecektir. Böylece CVRP, genişletilebilecek ve fabrika, hava limanı, inşaat alanı (örneğin şantiyeler), liman (örneğin konteynırların nakliyesi), otobüs terminali veya tesis gibi dar ve kapalı alanlarda uygulanabilir hâle dönüştürülebilecektir. Ayrıca, geliştirilen sistem gerçek-zamanlı problemlerin çözümü için de uyarlanabilecektir.

Hesaplamasal teknolojilerde ciddi gelişmeler olsa da geliştirilen çözüm yöntemlerinin endüstriyel gereksinimlerle her zaman paralel olduğu söylenemez. VRP, son derece önemli bir problemdir ve engel içeren ortamlarda da çözüme ulaştırılarak, endüstride bu kapsamdaki boşluğun doldurulmasında önemli katkılarda bulunulabilir. Önerilen çözümün pratik bir biçimde uygulanabilmesi mümkün olup; (1) üretilen çözümle, insanlara, robotlara, sürücülü/otomatik araçlara ait en uygun rota kümesi belirlenebilecek ve (2) taşımacılık işlerinde maliyetlerin düşmesiyle, ekonomik anlamda da katkılar sağlanabilecektir.

10. ÖNERİLER

Rotalamaya ilişkin yönlendirmeler, engel içeren ortamlarda ve mevcut engeller dikkate alınacak şekilde yapılabilirdir. Rotalama problemlerinin bu tür ortamlarda ele alınması, gerçek-dünya problemleri için uygulanabilir çıktılar sağlayabilir. Bu yeni problem, ARP, CVRP dışındaki diğer VRP türleri, gezgin robotların gezinimi, LRP ve TSP gibi literatürde çalışılan ilgili problemler için ele alınabilir. Benzer problemler engel içeren ortamlara uyarlanarak ve etkili çözüm yöntemleri geliştirilerek, endüstriye uyarlanabilir hâle getirilebilir. Bu durum, bu kapsamdaki boşluğun doldurulması noktasında önemli getiriler sağlayacaktır. Bu nedenle, bu kapsamda daha çok araştırma yapılması gerektiği düşünülmektedir.

Çözüm için GA tabanlı yöntemler dışında, guguk kuşu algoritması, karınca kolonisi eniyilemesi algoritması ve yapay arı kolonisi algoritması gibi sürü zekâsı tabanlı yaklaşımlar; benzetimli tavlama, tabu arama gibi yöntemler ve farklı yerel arama stratejileri kullanılabilir. Sezgisel yöntemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir, yakınsamalar ve çözüm kaliteleri incelenebilir. Ayrıca, tanımlanan probleme daha iyi sonuçlar verecek sezgisel yöntemler belirlenebilir. CVRP için son yıllarda geliştirilen literatürdeki en başarılı yöntemler, problemin tez çalışması kapsamında önerilen türüne uyarlanarak, çözüm başarısı artırılabilir.

Engel içeren ortamların ve benzer durumların, gerçek hayatta karşılaşılan bir kısıt olarak, literatürde daha çok çalışılması gerektiği düşünülmektedir. Bu amaçla, tez çalışmasında önerilen yöntem, farklı problemlerin çözümü için uygulanabilir. Oluşturulan modelin başarımı, akıllı ulaşırma sistemlerinde güzergâhların belirlenmesinde test edilebilir. Ayrıca model, genişletilerek, engellerin sürekli yer değiştirdiği veya değiştirebildiği, eklenip çıkarılabildiği ve şekil değiştirebildiği durumlara ve/veya farklı problemlere de uyarlanabilir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Adolf, F.M., Andert, F. and Rocha, J.G.F.**, 2010, Rapid online path planning onboard a VTOL UAV, *AIAA Infotech@Aerospace*, April 20-22, Atlanta, Georgia.
- Aghababa, M.P.**, 2012, 3D path planning for underwater vehicles using five evolutionary optimization algorithms avoiding static and energetic obstacles, *Applied Ocean Research*, 38:48-62pp.
- Alatartsev, S., Stellmacher, S. and Ortmeier, F.**, 2015, Robotic task sequencing problem: a survey, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 80(2):279-298pp.
- Alba, E. and Dorronsoro, B.**, 2006, Computing nine new best-so-far solutions for capacitated VRP with a cellular Genetic Algorithm, *Information Processing Letters*, 98(6):225-230pp.
- Arıcı, V.**, 2008, Engellerin Bulunduğu Ortamda Gezgin Robotun En İyi Yolu Bulması ve İzlemesi, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 96s (yayımlanmamış).
- Bayzan, Ş.**, 2005, Araç Rotalarının En Kısa Yol Algoritmaları Kullanılarak Belirlenmesi ve .NET Ortamında Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 96s (yayımlanmamış).
- Belkhouche, F. and Belkhouche, B.**, 2007, Wheeled mobile robot navigation using proportional navigation, *Advanced Robotics*, 1-26pp.
- Berger, J. and Barkaoui, M.**, 2003, A hybrid genetic algorithm for the capacitated vehicle routing problem, *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'03): Part I*, 646-656pp, *Lecture Notes in Computer Science*, 2723.
- Berger, J. and Barkaoui, M.**, 2004, A parallel hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows, *Computers & Operations Research*, 31(12):2037-2053pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Biswas, B.**, 2014, Online Path Planning of a Mobile Robot using an Ultrasonic Range Sensor, MSc Thesis, Jadavpur University The Faculty Of Engineering & Technology, 70p (unpublished).
- Bock, A. and Sanità, L.**, 2013, On the approximability of two capacitated vehicle routing problems, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 41:519-526pp.
- Boonsam, P., Suthikarnnarunai, N. and Chitphaiboon, W.**, 2011, Assignment problem and vehicle routing problem for an improvement of cash distribution, *World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS)*, Vol II, October 19-21, San Francisco, USA.
- Bortfeldt, A.**, 2012, A hybrid algorithm for the capacitated vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints, *Computers & Operations Research*, 39(9):2248-2257pp.
- Braysy, O. and Gendreau, M.**, 2005, Vehicle routing problem with time windows, part i: route construction and local search algorithms, *Transportation Science*, 39(1):104-118pp.
- Brimberg, J., Drezner, Z., Mladenović, N. and Salhi, S.**, 2014, A new local search for continuous location problems, *European Journal of Operational Research*, 232(2):256-265pp.
- Burke, E. and Kendall, G.**, 1999, Applying ant algorithms and the no fit polygon to the nesting problem, *Advanced Topics in Artificial Intelligence: 12th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, 453-464pp, December 6-10, Sydney, Australia.
- Cacchiani, V., Hemmelmayr, V.C. and Tricoire, F.**, 2014, A set-covering based heuristic algorithm for the periodic vehicle routing problem, *Discrete Applied Mathematics*, 163(1):53-64pp.
- Ceschia, S., Schaerf, A. and Stützle, T.**, 2013, Local search techniques for a routing-packing problem, *Computers & Industrial Engineering*, 66(4):1138-1149pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chand, P. and Mohanty, J.R.**, 2013a, A multi-objective vehicle routing problem using dominant rank method, *International Conference in Distributed Computing & Internet Technology (ICDCIT)*, *International Journal of Computer Applications (IJCA)*, 69(26):29-34pp.
- Chand, P. and Mohanty, J.R.**, 2013b, Solving vehicle routing problem with proposed non-dominated sorting genetic algorithm and comparison with classical evolutionary algorithms, *International Journal of Computer Applications (IJCA)*, 69(26):34-41pp.
- Chand, P., Mishra, B.S.P. and Dehuri, S.**, 2010, A multi objective genetic algorithm for solving vehicle routing problem, *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, 2(2):503-506pp.
- Chang, F.S., Wu, J.S., Lee, C.N. and Shen, H.C.**, 2014, Greedy-search-based multi-objective genetic algorithm for emergency logistics scheduling, *Expert Systems with Applications*, 41(6):2947-2956pp.
- Cheng, C.B. and Wang, K.P.**, 2009, Solving a vehicle routing problem with time windows by a decomposition technique and a genetic algorithm, *Expert Systems with Applications*, 36(4):7758-7763pp.
- Clarke, G. and Wright, J.V.**, 1964, Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, *Operations Research*, 12(4):568-581pp.
- CodeProject**, 2008, “Convex Hull”, <http://www.codeproject.com/Articles/29275/Convex-Hull> (Erişim tarihi: 11 Aralık 2014).
- Coleman, D.M. and Wunderlich, J.T.**, 2008, O^3 : an optimal and opportunistic path planner (with obstacle avoidance) using voronoi polygons, *10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, 1:371-376pp, Trento, Italy.
- Computational Infrastructure for Operations Research**, 2003, “Vehicle Routing Data Sets”, <http://www.coin->

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

or.org/SYMPHONY/branchandcut/VRP/data/index.htm.old (Erişim tarihi: 14 Şubat 2016).

Çalışkan, K., 2011, Karınca Kolonisi Optimizasyonu ile Araç Rotalama Probleminin Maliyetlerinin Kümeleme Tekniği ile İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 97s (yayımlanmamış).

Çiçekdeş, B., 2011, A Genetic Algorithm Approach for a Real Life Heterogeneous Capacitated Vehicle Routing Problem, MSc Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, 108p (unpublished).

Da Silveira, J.L.M., Miyazawa, F.K. and Xavier, E.C., 2013, Heuristics for the strip packing problem with unloading constraints, *Computers & Operations Research*, 40(4):991-1003pp.

Dantzig, G.B. and Ramser, J.H., 1959, The truck dispatching problem, *Management Science*, 6(1):80-91pp.

De Jong, K.A., 1975, An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, PhD Thesis, The University of Michigan Computer and Communication Sciences, 271p (unpublished).

Demircioğlu, M., 2009, Araç Rotalama Probleminin Sezgisel Bir Yaklaşım ile Çözümlemesi Üzerine Bir Uygulama, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 163s (yayımlanmamış).

Derbel, H., Jarboui, B., Hanafi, S. and Chabchoub, H., 2012, Genetic algorithm with iterated local search for solving a location-routing problem, *Expert Systems with Applications*, 39(3):2865-2871pp.

Discrete and Combinatorial Optimization, 2007, “Optimal solutions for symmetric TSPs”, <http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/STSP.html> (Erişim tarihi: 14 Şubat 2016).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Discrete and Combinatorial Optimization**, 2008, “Index of /software/TSPLIB95/tsp”, <http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/tsp/> (Erişim tarihi: 14 Şubat 2016).
- Dolinskaya, I.S.**, 2009, Optimal Path Finding in Direction, Location and Time Dependent Environments, PhD Thesis, The University of Michigan Industrial and Operations Engineering, 170p (unpublished).
- Du, L. and He, R.**, 2012, Combining Nearest Neighbor Search with Tabu Search for Large-Scale Vehicle Routing Problem, *Physics Procedia*, 25:1536-1546pp, *International Conference on Solid State Devices and Materials Science*, April 1-2, Macao.
- Dursun, P.**, 2009, Zaman Pencereyi Araç Rotalama Problemi’nin Genetik Algoritma ile Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 95s (yayımlanmamış).
- Elinas, P.**, 2009, Multi-goal planning for an autonomous blasthole drill, *Nineteenth International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*, 342-345pp.
- Erol, V.**, 2006, Araç Rotalama Problemleri için Populasyon ve Komşuluk Tabanlı Metasezgisel Bir Algoritmanın Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 172s (yayımlanmamış).
- Faigl, J., Vonásek, V. and Preucil, L.**, 2011, A multi-goal path planning for goal regions in the polygonal domain, *European Conference on Mobile Robots*, 171-176pp.
- Fuellerer, G., Doerner, K.F., Hartl, R.F. and Iori, M.**, 2010, Metaheuristics for vehicle routing problems with three-dimensional loading constraints, *European Journal of Operational Research*, 201(3):751-759pp.
- Fukasawa, R., Lysgaard, J., de Aragão, M.P., Reis, M., Uchoa, E. and Werneck, R.F.**, 2006, Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem, *Mathematical Programming*, 106(3):491-511pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Fung, R.Y.K., Liu, R. and Jiang, Z.**, 2013, A memetic algorithm for the open capacitated arc routing problem, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 50:53-67pp.
- Gendreau, M., Potvin, J.Y., Bräumlaysy, O., Hasle, G. and Løkketangen, A.**, 2008, Metaheuristics for the vehicle routing problem and its extensions: a categorized bibliography, 143-169 *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, Golden, B.L., Raghavan, S. and Wasil, E.A. (Eds.), Springer US, 43, New York, 591p.
- Gerdan, O.**, 2007, Müşteriler Arası Malzeme Akışlı Eş Zamanlı Dağıtım-Toplama Yapılan Araç Rotalama Problemi ve Sezgisel Çözümü, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 155s (yayımlanmamış).
- Ghoseiri, K. and Ghannadpour, S.F.**, 2010, Multi-objective vehicle routing problem with time windows using goal programming and genetic algorithm, *Applied Soft Computing*, 10(4):1096-1107pp, *Optimisation Methods & Applications in Decision-Making Processes*.
- Goldberg, D.E.**, 1989, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, *Addison-Wesley*.
- Golden, B.L., Raghavan, S. and Wasil, E.A.**, 2008, The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges, Springer US, 43, New York, 591p.
- Göksal, F.P.**, 2010, Eşzamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi için Sezgisel Yaklaşımlar: Genetik Algoritma ve Kuş Sürüsü Eniyileme, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 89s (yayımlanmamış).
- Hà, M.H., Bostel, N., Langevin, A. and Rousseau, L.M.**, 2014, An exact algorithm and a metaheuristic for the generalized vehicle routing problem with flexible fleet size, *Computers & Operations Research*, 43:9-19pp.
- Hezer, S.**, 2010, Eş Zamanlı Dağıtımlı ve Toplamalı Araç Rotalama Problemlerinin Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu Algoritması ile

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Çözümü, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 52s (yayımlanmamış).

Ho, W., Ho, G.T.S., Ji, P. and Lau, H.C.W., 2008, A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(4):548-557pp.

Holland, J.H., 1975, Adaptation in Natural and Artificial Systems, PhD Thesis, MI: The University of Michigan Press, 211p (unpublished), Ann Arbor, Michigan, USA.

İşleyen, S.K., 2008, Lojistik Yönetim Sistemlerinde Stokastik Talepli Araç Rotalama Problemi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 109s (yayımlanmamış).

Janoušek, P. and Faigl, J., 2013, Speeding up coverage queries in 3d multi-goal path planning, *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 5082-5087pp, May 6-10, Karlsruhe, Germany.

Jin, J., Crainic, T.G. and Løkketangen, A., 2014, A cooperative parallel metaheuristic for the capacitated vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, 44:33-41pp.

Jozefowicz, N., Semet, F. and Talbi, E., 2009, An evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with route balancing, *European Journal of Operational Research*, 195(3):761-769pp.

Karaoğlu, İ., 2009, Dağıtım Ağları Tasarımında Yer Seçimi ve Eşzamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemleri, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 130s (yayımlanmamış).

Ke, L. and Feng, Z., 2013, A two-phase metaheuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, 40(2):633-638pp.

Kemer, B., 2010, Araç Rotalama Problemlerine Genetik Algoritma Yaklaşımı: Bir Gıda Dağıtım Firması Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 105s (yayımlanmamış).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Khar, R.T. and Hall, E.L.**, 2004, Calculation of the shortest-time path for traversal of an obstacle course by a robot, *Proc. of SPIE Intelligent Robots and Computer Vision XXI: Algorithms, Techniques, and Active Vision*, 5608, October, Philadelphia.
- Kirlik, G.**, 2009, Yeni Bir Kapasiteli Ayrıt Rotalama Problemi ve Çözüm Yaklaşımları, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 136s (yayımlanmamış).
- Kulgu, T.**, 2007, Control of an Obstacle Avoider Mobile Robot using Image Processing, MSc Thesis, Boğaziçi University The Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, 76p (unpublished).
- Kuo, R.J., Zulvia, F.E. and Suryadi, K.**, 2012, Hybrid particle swarm optimization with genetic algorithm for solving capacitated vehicle routing problem with fuzzy demand – a case study on garbage collection system, *Applied Mathematics and Computation*, 219(5):2574-2588pp.
- Küçükceylan, O.**, 2007, Gezgin Robotların Engelli Bir Ortamda Hedefe Erişme Problemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 99s (yayımlanmamış).
- Laporte, G.**, 2009, Fifty years of vehicle routing, *Transportation Science*, 43(4):408-416pp.
- Le Bouthillier, A. and Crainic, T.G.**, 2005, A cooperative parallel meta-heuristic for the vehicle routing problem with time windows, *Computers & Operations Research*, 32(7):1685-1708pp.
- Lei, H., Laporte, G. and Guo, B.**, 2011, The capacitated vehicle routing problem with stochastic demands and time windows, *Computers & Operations Research*, 38(12):1775-1783pp.
- Leung, S.C.H., Zhang, Z., Zhang, D., Hua, X. and Lim, M.K.**, 2013, A meta-heuristic algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problems with two-dimensional loading constraints, *European Journal of Operational Research*, 225(2):199-210pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lewis, H.F. and Sexton, T.R.**, 2007, On the tour partitioning heuristic for the unit demand capacitated vehicle routing problem, *Operations Research Letters*, 35(3):374-378pp.
- Li, J.**, 2012, Research on team orienteering problem with dynamic travel times, *Journal of Software*, 7(2):249-255pp.
- Lin, S. and Kernighan, B.W.**, 1973, An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem, *Operations Research*, 21(2):498-516pp.
- Lin, S.W., Lee, Z.J., Ying, K.C. and Lee, C.Y.**, 2009, Applying hybrid meta-heuristics for capacitated vehicle routing problem, *Expert Systems with Applications*, 36(2):1505-1512pp.
- Lirov, Y.**, 1987, A locally optimal fast obstacle-avoiding path-planning algorithm, *Mar/d Modelling*, 9(1):63-68pp.
- Liu, S.**, 2013, A hybrid population heuristic for the heterogeneous vehicle routing problems, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 54:67-78pp.
- Longo, H., de Aragão, M.P. and Uchoa, E.**, 2006, Solving capacitated arc routing problems using a transformation to the CVRP, *Computers & Operations Research*, 33(6):1823-1837pp.
- Lozano-Pérez, T. and Wesley, M.A.**, 1979, An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles, *Communications of the ACM*, 22(10):560-570pp.
- Lumelsky, V.J. and Stepanov, A.A.**, 1987, Path-planning strategies for a point mobile automaton moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape, *Algorithmica*, 2(1):403-430pp.
- Luo, J. and Chen, M.R.**, 2014, Improved shuffled frog leaping algorithm and its multi-phase model for multi-depot vehicle routing problem, *Expert Systems with Applications*, 41(5):2535-2545pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lysgaard, J., Letchford, A.N. and Eglese, R.W.**, 2004, A new branch-and-cut algorithm for the capacitated vehicle routing problem, *Mathematical Programming*, 100(2):423-445pp.
- Mabgar, S.**, 2008, Solving the capacitated vehicle routing problem in parallel by evolutionary metaheuristics, *International Scientific Conference Computer Science*, 140-146pp, Sofia.
- Marinakis, Y., Iordanidou, G.R. and Marinaki, M.**, 2013, Particle swarm optimization for the vehicle routing problem with stochastic demands, *Applied Soft Computing*, 13(4):1693-1704pp.
- Martínez-Salazar, I.A., Molina, J., Ángel-Bello, F., Gómez, T. and Caballero, R.**, 2014, Solving a bi-objective transportation location routing problem by metaheuristic algorithms, *European Journal of Operational Research*, 234(1):25-36pp.
- Masum, A.K.M., Shahjalal, M., Faruque, F. and Sarker, I.H.**, 2011, Solving the vehicle routing problem using genetic algorithm, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 2(7):126-131pp.
- Mazzeo, S. and Loiseau, I.**, 2004, An ant colony algorithm for the capacitated vehicle routing, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 18:181-186pp, *Latin-American Conference on Combinatorics, Graphs and Applications*.
- Min, H.**, 1989, The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup points, *Transportation Research Part A: General*, 23(5):377-386pp.
- Mirolo, C. and Pagello, E.**, 2003, A new cell-subdivision approach to plan free translations in cluttered environments, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 38(1):5-30pp.
- Monroy, I.M., Amaya, C.A. and Langevin, A.**, 2013, The periodic capacitated arc routing problem with irregular services, *Discrete Applied Mathematics*, 161(4-5):691-701pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Morin, M.**, 2010, Multi-Criteria Path Planning with Terrain Visibility Constraints: The Optimal Searcher Path Problem with Visibility, MSc Thesis, Laval University Faculty of Science and Engineering, 118p (unpublished).
- Moscato, P. and Cotta, C.**, 2003, A gentle introduction to memetic algorithms, 105-144 Handbook of Metaheuristics, Glover, F. and Kochenberger, G.A. (Eds.), Springer US, 57, Boston MA, 560p.
- Moura, A., Rijo, R., Silva, P. and Crespo, S.**, 2010, A multi-objective genetic algorithm applied to autonomous underwater vehicles for sewage outfall plume dispersion observations, *Applied Soft Computing*, 10(4):1119-1126pp.
- Mueggler, E., Faessler, M., Fontana, F. and Scaramuzza, D.**, 2014, Aerial-guided navigation of a ground robot among movable obstacles, *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 1-8pp.
- Networking and Emerging Optimization**, 2013, “Capacitated VRP Instances | Vehicle Routing Problem”, <http://neo.lcc.uma.es/vrp/vrp-instances/capacitated-vrp-instances/> (Erişim tarihi: 14 Şubat 2016).
- OR Complete | Collective Operations Research Blog**, 2012, “Solving Vehicle Routing Problem”, <http://www.orcomplete.com/computer/sertalpbilal/solving-vehicle-routing-problem> (Erişim tarihi: 19 Ocak 2016).
- Özfırat, P.M.**, 2008, Exact and Heuristic Algorithms for the Variants of the Vehicle Routing Problem, PhD Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, 304p (unpublished).
- Özsoydan, F.B.**, 2011, Birikimli Açık Araç Rotalama Problemi için Sezgisel Çözüm Yaklaşımları, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 139s (yayımlanmamış).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Parlaktuna, O., Sipahioğlu, A. and Yazıcı, A.,** 2007, A vrp-based route planning for a mobile robot group, *Turk J Elec Engin*, 15(2):187-197pp.
- Parvez, W. and Dhar, S.,** 2013, Path planning optimization using genetic algorithm – a literature review, *International Journal of Computational Engineering Research*, 3(4):23-28pp.
- Polimeni, A. and Vitetta, A.,** 2012, A procedure for an integrated network and vehicle routing optimisation problem, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54:65-74pp, *15th Meeting of the EURO Working Group on Transportation (EWGT2012)*, September, Paris.
- Polishchuk, V.,** 2007, Thick Non-Crossing Paths and Minimum-Cost Continuous Flows in Polygonal Domains, PhD Thesis, Stony Brook University Applied Mathematics and Statistics (Operations Research), 177p (unpublished).
- Pop, P.C., Matei, O. and Sitar, C.P.,** 2013, An improved hybrid algorithm for solving the generalized vehicle routing problem, *Neurocomputing*, 109:76-83pp, *New Trends on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications — A selection of extended and updated papers from the SOCO 2011 International Conference*.
- Qureshi, G., Bajaj, P.R. and Puranik, P.V.,** 2012, Particle swarm optimization with genetic operators for vehicle routing problem, *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 4(7):3086-3090pp.
- Ralphs, T.K.,** 2003, Parallel branch and cut for capacitated vehicle routing, *Parallel Computing*, 29(5):607-629pp.
- Rao, N.S.V.,** 1995, On fast planning of suboptimal paths amidst polygonal obstacles in plane, *Theoretical Computer Science*, 140(2):265-289pp.
- Ribeiro, G.M. and Laporte, G.,** 2012, An adaptive large neighborhood search heuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, 39(3):728-735pp.
- Roque, W.L. and Doering, D.,** 2005, Trajectory planning for lab robots based on global vision and voronoi roadmaps, *Robotica*, 23(4):467-477pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ruan, Q., Zhang, Z., Miao, L. and Shen, H.**, 2013, A hybrid approach for the vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints, *Computers & Operations Research*, 40(6):1579-1589pp.
- Schittekat, P., Kinable, J., Sörensen, K., Sevaux, M., Spieksma, F. and Springael, J.**, 2013, A metaheuristic for the school bus routing problem with bus stop selection, *European Journal of Operational Research*, 229(2):518-528pp.
- Shafie, A.A.**, 2011, Optimal tour constructions for multiple mobile robots, *Journal of Engineering Science and Technology*, 6(2):215-227pp.
- Shaikh, A. and Dhale, A.**, 2013, AGV path planning and obstacle avoidance using dijkstra's algorithm, *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*, 2(6):77-83pp.
- Stanojević, M., Stanojević, B. and Vujošević, M.**, 2013, Enhanced savings calculation and its applications for solving capacitated vehicle routing problem, *Applied Mathematics and Computation*, 219(20):10302-10312pp.
- Subramanian, A., Uchoa, E. and Ochi, L.S.**, 2013, A hybrid algorithm for a class of vehicle routing problems, *Computers & Operations Research*, 40(10):2519-2531pp.
- Şahin, D.**, 2010, Rotalama Probleminin Veri Madenciliği ile Çözümü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, 55s (yayımlanmamış).
- Şeker, Ş.**, 2007, Araç Rotalama Problemleri ve Zaman Pencereli Stokastik Araç Rotalama Problemine Genetik Algoritma Yaklaşımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 139s (yayımlanmamış).
- Şevkli, A.Z.**, 2010, En Fazla Kazanç Sağlayan Rota Bulma Problemlerinin Sezgisel Yöntemlerle İncelenmesi, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, 135s (yayımlanmamış).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Şevkli, A.Z. and Sevilgen, F.E.**, 2012, Discrete particle swarm optimization for the team orienteering problem, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 20(2):231-239pp.
- Tabak, Ö.**, 2008, Genetik Algoritma ile Kapasiteli Servis Güzergahı Belirlenmesi ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 97s (yayımlanmamış).
- Tarantilis, C.D., Stavropoulou, F. and Repoussis, P.P.**, 2013, The capacitated team orienteering problem: a bi-level filter-and-fan method, *European Journal of Operational Research*, 224(1):65-78pp.
- Thakur, D., Likhachev, M., Keller, J., Kumar, V., Dobrokhodov, V., Jones, K., Wurz, J. and Kaminer, I.**, 2013, Planning for opportunistic surveillance with multiple robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 5750-5757pp, November 3-7, Tokyo.
- Tlili, T., Faiz, S. and Krichen, S.**, 2014, A hybrid metaheuristic for the distance-constrained capacitated vehicle routing problem, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 109:779-783pp, 2nd World Conference on Business, Economics and Management.
- Toth, P. and Vigo, D.**, 2002, The Vehicle Routing Problem, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, 9, Philadelphia, PA, 367p.
- Türk Dil Kurumu**, “Büyük Türkçe Sözlük”, http://www.tdk.gov.tr/index.php?option=com_bts&view=bts (Erişim tarihi: 23 Ocak 2016).
- Uchoa, E., Pecin, D., Pessoa, A., Poggi, M., Subramanian, A. and Vidal, T.**, 2014, New benchmark instances for the capacitated vehicle routing problem, *Technical Report - ArXiv 2014-10-4597*, (unpublished).
- Uğur, A.**, 2008, Path planning on a cuboid using genetic algorithms, *Information Sciences*, 178(16):3275-3287pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ünsal, M.Ç.**, 2010, Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi: M.T.A. Servis Güzergahlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 95s (yayımlanmamış).
- Vidal, T., Crainic, T.G., Gendreau, M. and Prins, C.**, 2014, A unified solution framework for multi-attribute vehicle routing problems, *European Journal of Operational Research*, 234(3):658-673pp, *Discrete Optimization*.
- Wang, C.H. and Lu, J.Z.**, 2009, A hybrid genetic algorithm that optimizes capacitated vehicle routing problems, *Expert Systems with Applications*, 36(2):2921-2936pp.
- Wang, Y.**, 2012, Solving the capacitated vehicle routing problem by cellular ant algorithm, *Journal of Information & Computational Science*, 9(8):2295-2304pp.
- Waveren, J.M.P. and Rothkrantz, L.J.M.**, 2008, Automated static and dynamic obstacle avoidance in arbitrary 3d polygonal worlds, *Mobile Robots Motion Planning New Challenges*, 455-468pp.
- Wu, Y., Ji, P. and Wang, T.**, 2008, An empirical study of a pure genetic algorithm to solve the capacitated vehicle routing problem, *ICIC Express Letters*, 2(1):41-45pp.
- Xidias, E.K. and Azariadis, P.N.**, 2011, Mission design for a group of autonomous guided vehicles, *Robotics and Autonomous Systems*, 59(1):34-43pp.
- Yan, H., Wang, H., Chen, Y. and Dai, G.**, 2008a, Mobile robot navigation in the triangulation of dynamic environment, *IEEE International Conference on Information and Automation*, 776-783pp, June 20-23, Zhangjiajie, China.
- Yan, H., Wang, H., Chen, Y. and Dai, G.**, 2008b, Path planning based on constrained delaunay triangulation, *7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 5168-5173pp, June 25-27, Chongqing, China.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yurtkuran, A. and Emel, E.,** 2010, A new hybrid electromagnetism-like algorithm for capacitated vehicle routing problems, *Expert Systems with Applications*, 37(4):3427-3433pp.
- Yücenur, G.N. and Demirel, N.Ç.,** 2011, A hybrid algorithm with genetic algorithm and ant colony optimization for solving multi-depot vehicle routing problems, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, Sigma 29(3):340-350pp.





ÖZGEÇMİŞ

Mehmet KARAKOÇ, Türkiye vatandaşı olarak, 26 Haziran 1987’de Antalya’da dünyaya geldi. İlköğretim ve lise öğrenim aşamalarını Antalya’da tamamladı. 2005-2009 yılları arasında, Denizli Pamukkale Üniversitesi – Bilgisayar Mühendisliği Bölümü lisans öğrenimini; 2009-2011 yılları arasında ise aynı üniversitede, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı tezli yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2011 yılında, İzmir Ege Üniversitesi – Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı’nda tezli doktora öğrenimine başladı. 2014 yılı Haziran ayından bu yana, Antalya Akdeniz Üniversitesi – Bilgisayar Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi’nde, mühendis olarak Java tabanlı web projeleri üzerinde çalışmaktadır. Kendisi ayrıca, hem çalıştığı birim içindeki hem de ilgi alanları kapsamındaki araştırmalarına da devam etmektedir. Görüntü işleme, yapay zekâ, genetik algoritmalar, yapay sinir ağları ve eniyileme problemleri ise çalışma alanlarından bazılarıdır.

EKLER

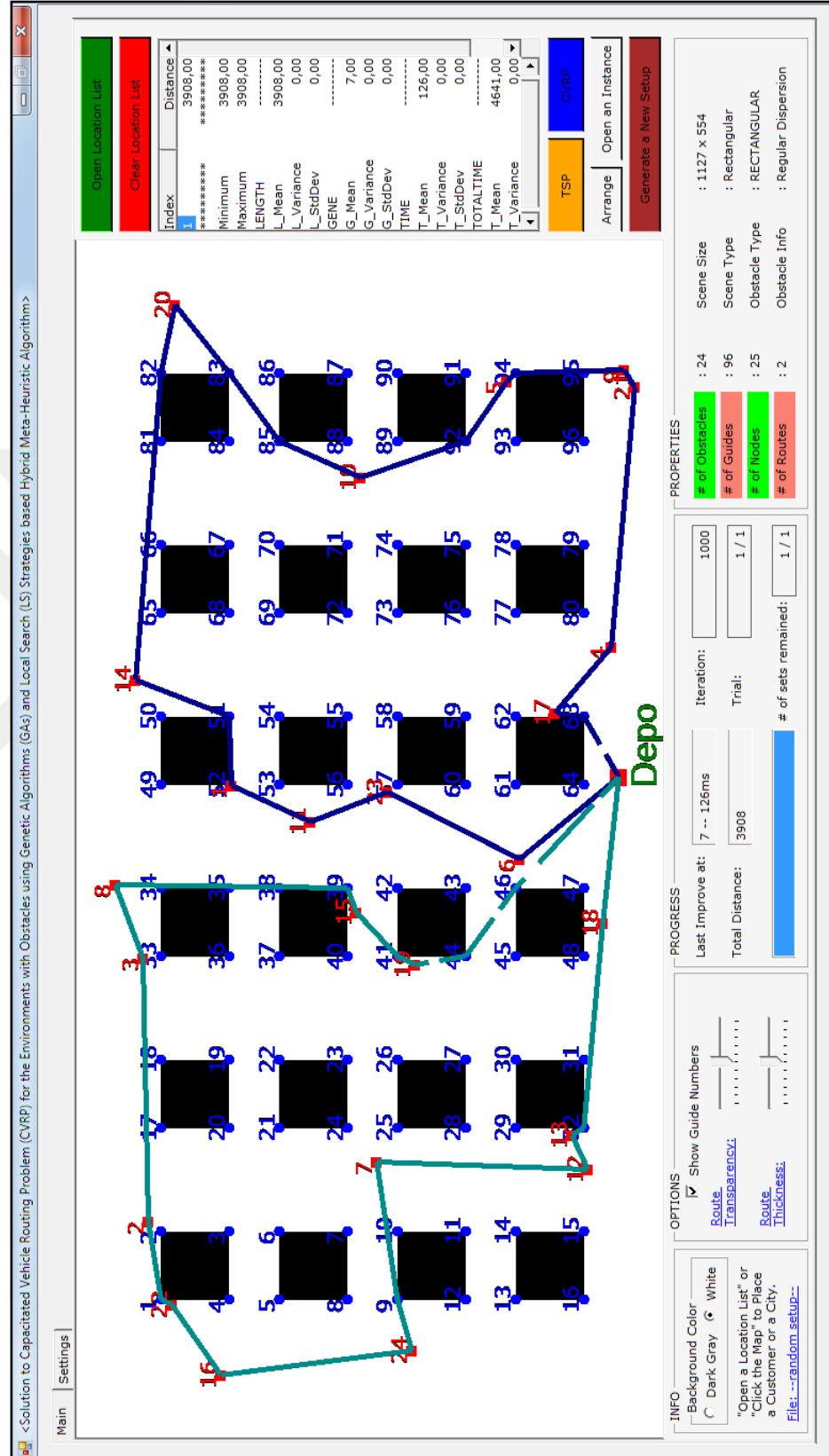
Ek 1 Geliştirilen Yazılıma İlişkin Arayüzün Ana Sayfası

Ek 2 Geliştirilen Yazılıma İlişkin Arayüzün Ayarlar Sayfası

Ek 3 Engel İçeren-İçermeyen Ortamlara İlişkin Çözümdeki Değişim



Ek 1 Geliştirilen Yazılıma İlişkin Arayüzün Ana Sayfası



Geliştirilen yazılıma ilişkin arayüzün ana sayfası için ekran görüntüsü.

Ek 2 Geliştirilen Yazılıma İlişkin Arayüzün Ayarlar Sayfası

<Solution to Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) for the Environments with Obstacles using Genetic Algorithms (GA) and Local Search (LS) Strategies based Hybrid Meta-Heuristic Algorithms>

Main Settings

GA Parameters

Population Size: 100

Maximum Number of Generations: 1000

Mutation Probability (%): 5

Crossing-Over Probability (%): 80

Nearest Neighbor

Number of the Closest Nodes: 5

Probability in Applying (%): 90

Fitness Function --Coefficients--

Alpha for the number of routes: 0,7

Beta for the total distance: 0,5

CVRP Parameters

Customer Demand: 10

Vehicle Capacity: 120

Random Seed: 0

Group Size: 100

The Number of Routes

Minimum Route Count: ☒ Constant Route Count

Other GA Parameters

Number of Trials: 1

Apply Mutation (%) (LS is not included!): ☐

Crossing-Over Improvement (%): 50

Multiple Mutation (%): 50

Population Reformulation: ☐ Reform

Selection Type

☐ Default/Random Selection

☐ Rank-based Selection

☐ Roulette-Wheel Selection

☒ Tournament Selection

Setup Attributes

☐ isTheWorkingAreaSquared

☒ isThreaded

☐ readFromFile

☒ displayOutputBegin

☒ displayOutputEnd

☐ addObstacleAfterVRPCustomers

Obstacles

Number of Rows (Vertical): 4

Number of Columns (Horizontal): 6

Radius of Circle / Half Edge of Polygon: 32

☒ with obstacles

Obstacle Type

☐ Circular

☒ Rectangular

☐ Hexagonal

Node

Number of Nodes: 25

Use a Standard Set of Points: ☐

City Selection

Customer/City XML File Name: ../../Cities.xml

Browse

TEST: Experiments for

☐ different numbers of customers

[different fullness rates of obstacles](#)

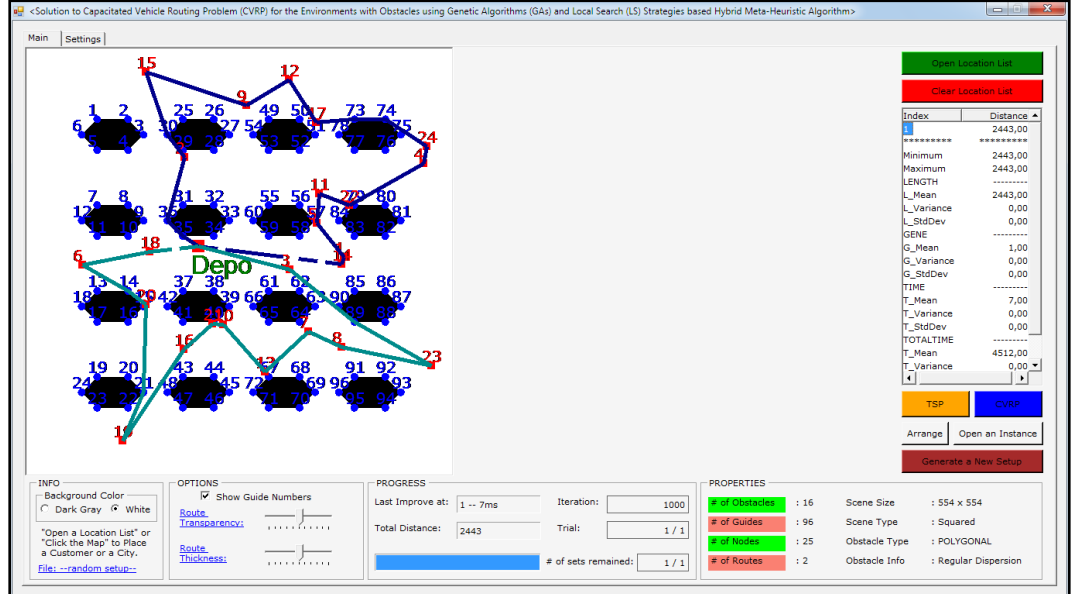
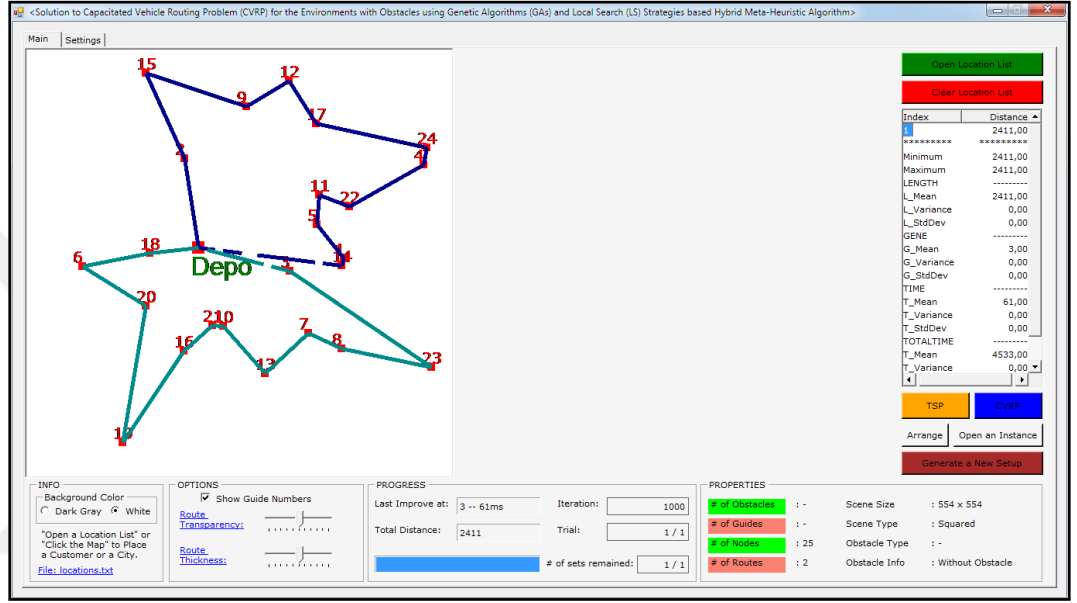
☐ different numbers of obstacles

☒ different sizes of obstacles

Geliştirilen yazılıma ilişkin arayüzün ayarlar sayfası için ekran görüntüsü.

Ek 3 Engel İçeren-İçermeyen Ortamlara İlişkin Çözümdeki Değişim

Engel içeren ve içermeyen ortamlar için çözümün değişimini göstermek amacıyla, engel içeren ortamda yapılan deney, engel içermeyen ortamda ve aynı şartlar altında yinelenmiştir. Bu amaçla, deneyde kullanılan depo-müşteri konumları, talep miktarları ve araç kapasitesi temel alınmıştır. Aynı veriler kullanılarak, güzergâhlar üretilmiş ve toplam rota uzunlukları belirlenmiştir.



Engel içeren-içermeyen ortamlara ilişkin çözümdeki değişim: (a) engel içermeyen ve (b) kenar uzunluğu 20 olan 16 (4×4) adet altıgensel engel ve 96 adet kılavuz içeren aynı ortamda deney (her talep miktarı 10 ve araç kapasitesi 120 iken, 24 müşteri ve iki rota için).

