



Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

İşletme Anabilim Dalı

Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

**DİNAMİK ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN KESİN VE
SEZGİSEL ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI GELİŞTİRİLMESİ**

Arif ESER

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2021

**DİNAMİK ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ İÇİN KESİN VE SEZGİSEL ÇÖZÜM
YAKLAŞIMLARI GELİŞTİRİLMESİ**

Arif ESER

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

İşletme Anabilim Dalı

Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2021

TEŞEKKÜRLER

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, birlikte çalışmaktan onur duyduğum kıymetli hocam Prof. Dr. Aydın ULUCAN'a,

Lisans eğitimimde değerli tecrübelerinden faydalandığım Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği ve Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine,

Değerli tecrübelerinden faydalandığım Hacettepe Üniversitesi İşletme Bölümü öğretim üyelerine,

Kıymetli zamanlarını ayırarak tezimi okuyan ve tavsiyelerde bulunan, çalışmamın daha iyi bir noktaya gelmesini sağlayan Doç. Dr. Mehmet SOYSAL, Doç. Dr. Kazım Barış ATICI, Dr. Öğr. Üyesi Sedat BELBAĞ ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÇİMEN'e,

Çalışmalarım ve hayatımda attığım adımlarda her zaman yanımda olup bana inanan arkadaşlarım Yasin ÖZKAN, Fatih AYDIN, Burak ÖZTÜRK ve Merve ÖZTÜRK'e,

Bugünlere gelmemi sağlayan, hiçbir zaman sevgi ve desteğini esirgemeyen ve her zaman destek olan annem Havva ESER, babam Şükrü ESER, kardeşim Tuğçe ESER, kardeşim Gamze TOPRAK ve eşi Mücahit TOPRAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Arif ESER. *Dinamik Araç Rotalama Problemi İçin Kesin ve Sezgisel Çözüm Yaklaşımları Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2021

Araç rotalama problemleri (ARP) birçok lojistik uygulamanın merkezinde yer almaktadır. Bir araç filosunun rotasının maliyet etkin olarak belirlenmesi birçok endüstride önemli bir rol oynamaktadır. Gelişen endüstri standartlarıyla birlikte gerçek zamanlı verilerin kullanıldığı dinamik ARP uygulamalarının önemi artmıştır. Rotalama problemlerini dinamik kılan temel unsur ise rotalama esnasında değişen ortam koşullarıdır.

Dinamik ARP, üretim ve lojistik alanındaki en önemli sorunlardan biridir. Dinamik ARP’de; müşteri taleplerinin oluşma anı, iptali ve değişmesi, hizmet süreleri, seyahat süreleri ve araçların kullanılabilirliği dinamizm kaynağı olarak ifade edilmektedir. Bu tez kapsamında ele alınan dinamik ARP’nin dinamizm kaynağı ise başlangıç rotalarının oluşturulması sonrasında müşterilerin bir kısmının bilinmeyen veya öngörülemez bir anda dinamik olarak ortaya çıkması veya mevcut müşteri talep miktarlarındaki değişim durumudur. Müşteri taleplerinin her zaman minimum maliyetle efektif bir şekilde karşılanabilmesi dinamik ARP çözümünün temel amacıdır.

Gerçek hayatta karşılaşılan problemlere karşı hızlı ve yüksek doğruluk oranı ile aksiyon alınması gerekliliği karşısında, dinamik ARP gibi NP-zor problemlerin çözümü için geliştirilen sezgisel algoritmalar büyük bir avantaj sunmaktadır. Özellikle araçların başlangıç rotasındaki müşteri taleplerini karşılarken dinamik taleplerin oluşması durumunda, yeniden rotalama yapılarak güncel rotaların hızlı bir şekilde düzenlenmesi önem arz etmektedir. Bu süre ne kadar kısa olur ise araçların gecikme olmadan müşteri taleplerini karşılaması da o kadar mümkün olacaktır. Bu nedenle büyük boyutlu problemlerde dinamik ARP yapılabilmesi amacıyla Clarke & Wright Tasarruf Algoritması baz alınarak Rassal İteratif MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması geliştirilmiştir.

Dinamik ARP'nin her bir problem boyutu için optimum çözüm imkanı sunan bir yöntem bulunmamaktadır. Bu nedenle akademik çalışmalar, mevcut teknolojik imkanlar doğrultusunda mümkün olan en büyük boyuttaki problemler için kesin çözüm metotlarının geliştirilmesi ve optimum sonuca en yakın sonucun en kısa sürede elde edilmesine imkan sunan algoritmalar üzerine yoğunlaşmıştır. Bu tez kapsamında ise dinamik ARP'ye çözüm imkanı sunan matematiksel model ve büyük boyutlu problemlerde hızlı ve yüksek doğruluk oranında çözümü garanti eden sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Araç Rotalama, Dinamik Araç Rotalama, Matematiksel Programlama, Clarke & Wright Tasarruf Algoritması

ABSTRACT

Arif ESER. *Constructing Exact and Heuristic Solution Approaches for Dynamic Vehicle Routing Problem*, Master Thesis, Ankara, 2021

Vehicle routing problems (VRP) are at the center of many logistics applications. Cost effective determination of the route of a vehicle fleet plays an important role in various industries. With the developing industry standards, the importance of real-time dynamic VRP applications has increased. The key factor that makes routing problems dynamic is the changeable environmental conditions while routing.

Dynamic VRP is one of the most important problems in production and logistics. The moment of occurrence, cancellation or change of customer demands, service times, travel times and availability of vehicles are expressed as sources of dynamism for dynamic VRP. The source of dynamism of the dynamic VRP addressed within the scope of this thesis is the dynamic emergence of some of the customers at an unknown or unpredictable moment or the change of the current client demand after the initial routes are created.

It is necessary to take action with a fast and high accuracy rate against the problems encountered in real life. Thankfully, heuristic algorithms developed to solve NP-hard problems such as dynamic vehicle routing offer remarkable and undeniable advantages. Especially in case of dynamic demands while meeting the customer requests in the starting route of the vehicles, it is the key factor to arrange up-to-date routes quickly by rerouting. It is undeniable that the shorter this period the more it can be possible for vehicles to meet customer demands without delay. Hence, Random Iterative MDROL-HFS CW Saving Algorithm has been developed based on Clarke & Wright Savings Algorithm to perform large-scale dynamic VRP.

There is no method that provides optimum solution for each problem dimension of dynamic VRP. For this reason, academic studies have focused on the development of exact solution methods for the largest possible problems in line with the current

technological possibilities and algorithms that allow the closest result to the optimum result in the shortest time. The main purpose of this master thesis is to develop a mathematical model that offers exact solutions to dynamic VRP and a heuristic algorithm that guarantees a fast and high accuracy solution in large-scale problems.

Keywords: Vehicle Routing, Dynamic Vehicle Routing, Mathematical Programming, Clarke & Wright Savings Algorithm

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜRLER	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
GİRİŞ	1
1. BÖLÜM: LİTERATÜR TARAMASI	4
1.1. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ	4
1.2. DİNAMİK ARAÇ ROTALAMA	10
1.3. SEZGİSEL CLARKE & WRIGHT TASARRUF ALGORİTMASI	16
2. BÖLÜM: DİNAMİK ARAÇ ROTALAMA	19
3. BÖLÜM: METODOLOJİ	24
3.1. PROBLEM TANIMI ve VARSAYIMLAR	24
3.2. KESİN ÇÖZÜM YÖNTEMİ	25
3.2.1. Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama (CVRP) Matematiksel Modeli	26
3.2.2. Çok Depolu Tersine Açık Uçlu Heterojen Kapasiteli Araç Rotalama Problemi (Multi Depot Reversed Open Loop with Heterogeneous Fleet Size Vehicle Routing Problem) MDROL – HFS VRP Matematiksel Modeli	27
3.3. SEZGİSEL ÇÖZÜM YÖNTEMİ	30
3.3.1. Clarke & Wright Tasarruf Algoritması	30
3.3.1.1. Standart Clarke & Wright Tasarruf Algoritması	30
3.3.1.2. Rassal Clarke & Wright Tasarruf Algoritması	31
3.3.1.3. Rassal İteratif Clarke & Wright Tasarruf Algoritması	32
3.3.2. Çok Depolu Tersine Açık Uçlu Heterojen Kapasiteli Clarke & Wright Tasarruf Algoritması (Multi Depot Reversed Open Loop CW Saving Algorithm with Heterogeneous Fleet Size – MDROL – HFS CW).....	32
3.3.2.1. Rassal MDROL – HFS Clarke & Wright Tasarruf Algoritması	40
3.3.2.2. Rassal İteratif MDROL – HFS Clarke & Wright Tasarruf Algoritması 41	
4. BÖLÜM: DİNAMİK ARAÇ ROTALAMA UYGULAMASI	42
4.1. VERİ SETLERİ	43

4.2. KESİN ÇÖZÜM YÖNTEMİ	44
4.2.1. Dinamik Araç Rotalama – Senaryo – I	46
4.2.2. Dinamik Araç Rotalama – Senaryo – II.....	49
4.2.3. Dinamik Araç Rotalama – Senaryo – III	52
4.3. SEZGİSEL ALGORİTMAYLA DİNAMİK ARAÇ ROTALAMA	56
4.3.1. Kapasite Kısıtlı Statik Araç Rotalama ile Başlangıç Çözümü	57
4.3.2. Dinamik Araç Rotalama (MDROL – HFS VRP) Matematiksel Model ve Sezgisel Algoritma Karşılaştırması	60
4.3.3. Farklı Zamanlarda Gelen Birden Çok Dinamik Talepli Dinamik Araç Rotalama	64
5. BÖLÜM: SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKÇA	69

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. Dinamik Araç Rotalama Kesin Çözüm Yöntemi ve Önerilen Sezgisel Algoritma Aşamaları	42
Tablo 2. Dinamik Araç Rotalama için Kullanılacak CVRP Veri Setleri ve Bilgiler	43
Tablo 3. Veri Seti – I Talep Noktaları Koordinat ve Talep Miktarı Bilgisi.....	44
Tablo 4. Veri Seti – I Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri.....	45
Tablo 5. Veri Seti – I Dinamik Talep Noktaları Koordinat ve Talep Miktarı Bilgisi – Senaryo – I	46
Tablo 6. Dinamik Talep Anında Araçların Kapasiteleri ve Koordinat Bilgileri – Senaryo – I	46
Tablo 7. Veri Seti – I MDROL – HFS VRP Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – I.....	47
Tablo 8. Veri Seti – I Dinamik Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – I	48
Tablo 9. Veri Seti – I Dinamik Talep Noktaları Koordinat ve Talep Miktarı Bilgisi– Senaryo – II.....	49
Tablo 10. Dinamik Talep Anında Araçların Kapasiteleri ve Koordinat Bilgileri – Senaryo – II.....	49
Tablo 11. Veri Seti – I MDROL – HFS Dinamik Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – II.....	50
Tablo 12. Veri Seti – I Dinamik Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – II.	51
Tablo 13. E-n22-k4 Veri Seti Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri ...	53
Tablo 14. E-n22-k4 Dinamik Talep Noktaları Koordinat ve Talep Miktarı Bilgisi – Senaryo – III.....	53
Tablo 15. E-n22-k4 Dinamik Talep Anında Araçların Kapasiteleri ve Koordinat Bilgileri – Senaryo – III.....	54
Tablo 16. E-n22-k4 MDROL – HFS Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – III.....	55
Tablo 17. E-n22-k4 Dinamik Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – III	56
Tablo 18. Kesin Çözüm Yöntemi Zaman Sınırı Bazında % Optimal Bilgisi	57
Tablo 19. Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritması % Optimal Bilgisi.....	58
Tablo 20. Kesin Çözüm Yöntemi vs Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritması.....	59
Tablo 21. Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritmasının Kesin Çözüm Yöntemine Üstünlük Tablosu.....	60
Tablo 22. Hizmet Edilen, Hizmet Edilmesi Gereken ve Dinamik Talep Noktası Bilgisi	61
Tablo 23. MDROL HFS – CW Tasarruf Algoritmasının MDROL – HFS Kesin Çözüm Yöntemine Üstünlük Matrisi.....	62
Tablo 24. Dinamik Müşteri Geliş Zamanı ve Adedi.....	64
Tablo 25. Dinamik Araç Rotalama Zaman Sınır Değerleri	65
Tablo 26. MDROL - HFS CW Tasarruf Sezgisel Algoritmasının Kesin Çözüm Yöntemine Üstünlüğü	66

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama	19
Şekil 2. Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi	20
Şekil 3. Tersine Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi	21
Şekil 4. Çok Depolu Tersine Açık Uçlu Heterojen Kapasiteli Dinamik Araç Rotalama	21
Şekil 5. Dinamik Araç Rotalama	22
Şekil 6. Veri Seti – I Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Sonucu.....	45
Şekil 7. Dinamik Talep Sonrası Veri Seti – I Dinamik Araç Rotalama (MDROL – HFS) Sonucu.....	47
Şekil 8. Veri Seti – I Dinamik Araç Rotalama – Senaryo – I – Başlangıç ve Dinamik Rota	48
Şekil 9. Dinamik Talep – Senaryo – II Sonrası Veri Seti – I MDROL – HFS Sonucu ..	50
Şekil 10. Veri Seti – I Dinamik Araç Rotalama – II Başlangıç ve Dinamik Rota.....	51
Şekil 11. E-n22-k4 Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Sonucu	53
Şekil 12. E-n22-k4 Dinamik Talep Sonrası E-n22-k4 Veri Seti MDROL – HFS Sonucu	54
Şekil 13. E-n22-k4 Dinamik Araç Rotalama – Başlangıç ve Dinamik Rota – Senaryo – III.....	55
Şekil 14. F- n45 – k4 Veri Seti MDROL – HFS Matematiksel Model vs. Önerilen Algoritma	63
Şekil 15. Zamana Bağlı Müşteri Geliş Dağılımı	64
Şekil 16. Dinamik Talepler Sonrası Oluşturulan Dinamik Rota Maliyetleri.....	65
Şekil 17. Dinamik Rotaların Kümülatif Mesafesi.....	66

GİRİŞ

Tedarik zinciri; tüm tedarik ağındaki rolü ve konumu olarak tedarik lojistiği (inbound), şirket içi lojistik (intracompany) ve sevkiyat lojistiği (outbound) olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Tedarik lojistiği; tedarik ağlarının bir başlangıç parçası olarak, hammadde veya yarı mamul ürünlerin imalatın gerçekleştirileceği alana taşıma işlemini kapsamaktadır. Tedarik zincirinin ikinci parçası olan şirket içi lojistik; temel olarak üretim sahasındaki malzeme akışlarıyla ilgilidir ve sevkiyat lojistiği ise müşterilere nihai ürün teslimatı ile ilgilidir.

Lojistik yönetimi, tedarik zinciri yönetiminin en önemli kısımlarından biri olmuştur (Chopra & Meindl, 2001). Küresel rekabetin giderek arttığı, üretilen ürünlerin en kısa sürede ve en az maliyetle teslimatının son derece kritik olduğu bir ortamda firmaların hayatta kalabilmesi için etkin lojistik yönetimi yapma ihtiyacı ön plana çıkmaktadır. Günümüzde lojistik sistemlerindeki karmaşıklık düzeyinin giderek artması ve buna paralel olarak taşıma maliyetlerinin toplam maliyet içerisindeki payının artmasından dolayı etkin lojistik yönetiminin yapılmasının önemi artmaktadır. Araç rotalama problemleri ise lojistik yönetimi karar verme sistemlerinde karşılaşılan en kritik problemlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Standart bir araç rotalama probleminde, depolardan çıkan araçlar vasıtasıyla farklı noktalarda bulunan müşteri talepleri karşılanmaya çalışılmaktadır. Araçlar; taksi, kamyon, gemi, insansız hava aracı veya otomatik yönlendirmeli araçlar (AGV) olabilir.

Talep noktalarına sunulan hizmet kalitesini artırmak, maliyetleri azaltmak ve ağ içerisinde araçların takip edeceği en uygun rotaları bulmak için araç rotalama problemleri ele alınmaktadır. Standart araç rotalama problemlerinde ağ içerisinde yer alan talep noktalarına ait ihtiyaçların karşılanması için depodan araç yönlendirmesi gerçekleştirilmektedir. Bu rotalama problemlerindeki amaç ise talep noktasına ait ihtiyaçların belirli kısıtlar altında en kısa sürede ve / veya en az maliyetle karşılanmasını sağlayacak rotalar kümesinin bulunmasıdır.

Araç rotalama problemleri lojistikte önemli bir yere sahiptir ve birçok lojistik uygulamanın temelini oluşturmaktadır. Bu problemlerin en iyi şekilde çözülmesi; işletmenin hem dağıtım maliyetlerini büyük ölçüde azaltmasını, hem de dağıtım sürelerinde önemli oranda tasarruf etmesini sağlayacaktır. Bir araç filosu için maliyet etkin olan rotanın belirlenmesi birçok endüstri için önemli bir yere sahiptir.

Etkin olmayan bir rota planı araç rotalama maliyetlerinde önemli bir artışa neden olmaktadır. Kısa sürede etkin rota planının elde edilebilmesi, firmalara maliyet avantajı sağlayarak rekabet üstünlüğü fırsatı sunmaktadır. Farklı çözüm yaklaşımları ile geliştirilmeye açık olması ve firmaların maliyetlerini minimize ederek rekabet avantajı elde etme girişimleri dikkate alındığında, araç rotalama özel şirketler ve akademik çalışmalar için motivasyon kaynağı olmuştur.

Araç rotalama problemine zaman boyutunun kazandırılması sonucu daha karmaşık bir yapıya sahip olan dinamik araç rotalama problemleri elde edilir. Dinamik araç rotalama problemi zor olması ve aynı zamanda günlük hayatta kullanım ihtiyacı nedeniyle de dikkat çekmektedir (Toth ve Vigo, 2014).

Standart statik araç rotalama problemlerinde bir rotalama çalışması gerçekleştirileceği zaman, normalde tüm girdi parametre değerlerinin kesin olarak bilindiği varsayılır. Gerçek hayat uygulamalarında ise müşteri talepleri, seyahat ve servis süreleri gibi parametrelerin hatta belirli bir müşterinin servise ihtiyaç duyup duymayacağına ilişkin bilgiler rota tasarım aşamasında genellikle belirsiz, eksik veya bilinmeyen girdi parametreleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bilgi ve İletişim Teknolojileri'nin (BİT) gelişmesiyle birlikte, araç rotalama problemlerinin gerçek zamanlı trafik koşulları, araç durumu ve yeni gelen talepler gibi güncellenmiş bilgiler altında incelenmesine olanak tanıyan dinamik araç rotalama problemlerinin önemi artmıştır.

Günümüz bilgi çağında kararların günlük hatta anlık alınması ihtiyacı ve alınan doğru kararların da hızla aksiyona geçirilmesi gerekmektedir. Gerek stratejik gerekse de operasyonel düzeyde dinamik olarak değişen şartların hızla fark edilmesi ve yeni şartlara da hızlı bir şekilde uyum sağlanması ihtiyacı bulunmaktadır. Çevrede değişen dinamik

durumlar bazen dağıtım ağındaki yeni bir talebin oluşması, mevcut talep sahibinin ihtiyacın değişmesi veya talebin iptal edilmesi olabilirken, bazen de bir ülke için stratejik keşif ve gözetleme görevini gerçekleştiren insansız hava aracı platformlarının dinamik olarak yönlendirmesi olabilmektedir. Dinamik değişen ortam şartları bazen de üretim alanında kullanılan AGV'nin üretim planını aksatmayacak şekilde hammadde, yarı mamul veya bitmiş ürün transferinin dinamik olarak planlanması olabilmektedir.

Yakıt dağıtım ağı planlaması, tehlikeli madde dağıtım ağları, servis güzergahlarının belirlenmesi, satış otomatlarındaki paranın toplanması, ATM'lerdeki para yönetiminin yapılması, şehir içi atıkların toplanması, sipariş dağıtımını, üretici ve tüketici arasındaki tüm aşamalardaki dağıtım ağının planlaması, uçakların rotalanması, acil servis hizmetleri (polis, itfaiye, ambulans vb.) ve fabrika içi hammadde, yarı mamul ve bitmiş ürünlerin yönlendirilmesi araç rotalama problemlerinin başlıca uygulama alanlarıdır.

İnsansız hava araçları ve drone kullanımının yaygınlaşması ve alternatif dağıtım ve ulaşım aracı olarak değerlendirilmesi, fabrika içerisinde otomatik yönlendirmeli araçların kullanımının yaygınlaşması, e-ticaret işlem hacminin artması ve dolayısıyla dağıtım ağının giderek yaygınlaşması dikkate alındığında dinamik araç rotalama problemlerinin önemi, farklı kullanım alanlarını ön plana çıkmaktadır.

Dinamik araç rotalama probleminin incelendiği tez çalışması 5 ana başlıktan oluşmaktadır. Birinci bölümde araç rotalama, dinamik araç rotalama ve sezgisel bir algoritma olan Clarke & Wright tasarruf algoritması için literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde dinamik araç rotalama problemine kısa bir giriş yapıldıktan sonra çalışmanın üçüncü bölümünde dinamik araç rotalama probleminin çözümü için bu tez kapsamında geliştirilmiş matematiksel model ile revize Clarke & Wright tasarruf algoritmasının metodolojisine yer verilmiştir. Dördüncü bölümde; dinamik araç rotalama problemleri için geliştirilen kesin çözüm yöntemi ve büyük boyutlu problemlerde kullanılması için geliştirilen sezgisel algoritmanın uygulamasına, matematiksel model ve sezgisel algoritmanın performansının değerlendirilmesine yer verilmiştir. Beşinci ve son bölümde ise elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve gelecek çalışmaları hakkında bilgilendirme yapılmıştır.

1. BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

1.1. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Genel olarak araç rotalama problemleri ailesi; bir taşıma talep ve araç filo seti verildiğinde, verilen araç filosu ile taşıma taleplerinin minimum maliyetle karşılanabileceği uygun rotaların ve taşıma taleplerinin hangi sıra ile karşılanacağı belirlenmesi olarak tanımlanmıştır (Toth ve Vigo, 2014).

Araç rotalama problemi; mesafe, kapasite ve zaman kısıtları dahilinde filodaki her bir aracın hedefine ulaşması için uygun rotaların belirlenmesi şeklinde ifade edilmektedir (Laporte, 2007).

Araç rotalama problemi ilk olarak Dantzig ve Ramser tarafından 1959 yılında benzin istasyonlarına benzin dağıtımını yapmak için geliştirilmiş matematiksel model ile ele alınmıştır (Dantzig ve Ramser, 1959).

Araç rotalama probleminin temel amacı, araçların aldıkları toplam mesafenin minimize edilmesidir. Standart araç rotalama probleminde dikkate alınan varsayımlar aşağıda belirtildiği gibidir;

- Tüm müşterilerin talepleri karşılanmalıdır.
- Her bir talep noktasına sadece bir araç ile, sadece bir kez gidilmelidir.
- Rota(lar) depoda başlayıp depoda sona ermelidir.
- Müşterilerin toplam talep miktarı, araçların toplam kapasitesini aşmamalıdır.

Araç rotalama problemleri günümüzde gazete, süt, ekmek, kargo, posta, tıbbi ve kimyasal atık toplama sistemi, akaryakıt, ilaç, ATM makinelerine para dağıtımını, personel taşımacılığı gibi birçok farklı sektörde kullanılmakta, araç rotalama problem türleri ve çözüm yöntemleri ise bu bölümde incelenmektedir.

Araç rotalama problemleri kısıtların durumuna, yolların durumuna, rotaların durumuna ve çevre durumuna göre 4 alt başlık altında incelenmektedir. Her bir kategori kendi içerisinde özelleşmiş alt başlıklara ayrılmaktadır.

Kısıtların durumuna göre; kapasite kısıtlı, mesafe kısıtlı, zaman pencereci, toplamalı ve dağıtımli, periyodik yüklemeli, bölünmüş talepli, stokastik ve çok depolu araç rotalama problemi üzere alt başlıkta incelenmektedir.

Araç rotalama problemi, yolların durumuna göre ise aynı yay üzerinde gidiş ve dönüş yollarının mesafe değerinin eşitlik durumuna göre simetrik veya asimetrik araç rotalama olarak gruplandırılmaktadır.

Rota durumuna göre sınıflandırıldığında ise açık uçlu araç rotalama problemi ve kapalı uçlu araç rotalama problemi olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Kapalı uçlu araç rotalamada, araçlar rotasını depodan başlatır ve depoda bitirir. Açık uçlu araç rotalama probleminde ise depodan başlayan rota herhangi bir talep noktasında veya orijinal başlangıç deposu haricinde bir depoda sona erer.

Çevre durumuna göre incelenen araç rotalama problemleri ise statik araç rotalama problemi ve dinamik araç rotalama problemi olarak iki başlığa ayrılmaktadır. Statik araç rotalama problemlerinde araç kapasitesi, talep miktarı gibi bilgiler bilinmekte ve bu veriler planlama periyodu süresince değişmemektedir. Talep noktalarına ait ihtiyaçların karşılandığı, herhangi bir zamanda yeni taleplerinin eklendiği, ihtiyaç duyulan araç sayısının değiştiği, mevcut rota bilgisinin değiştiği veya değişebilmesi gibi durumların ortaya çıkabildiği ve sistemin bu duruma hızlı bir şekilde yeni çözüm üretme ihtiyacının olduğu problemler, dinamik araç rotalama problemleri olarak sınıflandırılmaktadır.

Araç rotalama problemlerinin taşımacılık, lojistik ve tedarik zinciri gibi alanlarda aktif olarak kullanılması nedeniyle bu alan ile ilgili çalışmalar çeşitli başlıklar altında devam etmektedir. Literatürde araç rotalama problemleri ile ilgili yer alan çalışmaların detaylı olarak sınıflandırıldığı bir çalışma yer almaktadır (Eksioglu vd., 2009). Bu çalışmada problem türleri ve çalışmalar hakkında detaylı bilgi paylaşımı gerçekleştirilmiştir.

Araç rotalama problemleri ile ilgili Toth ve Vigo (2002) tarafından bir literatür taraması yapılmıştır.

Araç rotalama problemleri NP-zor (Non-deterministic Polynomial-time hard) problemler sınıfında yer almaktadır (Laporte, 2007). Bu problemlerin çözümünde kesin algoritmalar, sezgisel ve meta sezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Kesin çözüm yöntemi en iyi çözüm değerine ulaşmayı hedeflerken, sezgisel ve meta sezgisel algoritmalar ise en kısa sürede en iyi çözüm değerine yakın sonuçlar elde edilmesini hedeflemektedir.

Bu problemlerin çözümünde kullanılan kesin çözüm yöntemlerine örnek olarak, dal – sınır algoritmaları, dal – kesme algoritmaları, dal – kesme – fiyat algoritmaları ve dinamik programlama verilebilir. Araç rotalama problemlerinde kullanılan meta sezgisel yöntemlere ise tabu arama algoritması, benzetimli tavlama, karınca kolonisi ve genetik algoritmalar örnek olarak verilir. Kesin yöntemler, küçük boyutlu problemlerde optimal sonucu vermesine rağmen, problem boyutu arttıkça optimal çözüm elde edilmesi için ihtiyaç duyulan süre de artmaktadır.

Kesin algoritmaların, küçük boyutlu problemlerde hızlı çözüm sunması mümkünken büyük boyutlu problemlerde hesaplama süresi bakımından kullanılması zordur. Problem boyutu arttıkça kesin çözüm yöntemlerinin kullanılması üstel olarak zorlaşmaktadır (Chandler ve Pachter, 1998). Bu nedenle planlama süresinin önemli olduğu ve/veya hızlı çözüm elde edilmesi planlanan büyük boyutlu problemlerde daha kısa sürede optimale yakın çözümler sunan sezgisel algoritmaların kullanımı tercih edilmektedir.

Büyük boyutlu problemlerde optimal çözümün elde edilmesi için gereken sürenin azaltılması amacıyla, çeşitli sezgisel yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur. Sezgisel yöntemler ile büyük boyutlu problemler için daha az hesaplama süresi ile optimal çözüme yakın çözümler elde edilmektedir.

Sezgisel araç rotalama problemlerinin performansı genellikle doğruluk ve hız olmak üzere iki kritere göre ölçülmektedir. Basitlik ve esneklik ise sezgisel algoritmalarda dikkat edilmesi gereken diğer önemli iki kriter olarak ifade edilmektedir (Cordeau, 2002).

Araç rotalama problemlerine optimum veya yaklaşık çözüm elde edilebilmesi için literatürde birçok metot yer almaktadır. Zaman veya mesafe kısıtlaması, kapasite kısıtı, taleplerin planlama periyodundan önce bilinmesi veya dinamik olarak bilinmeyen bir anda ortaya çıkma durumu, problem büyüklüğü ve bir başka deyişle talep noktası sayısı ve depo sayısı gibi durumlar çeşitli araç rotalama problemlerinin oluşmasına ve bu

problemlerin çözümü için birbirinden farklı çözüm metotlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Araç rotalama problem çeşitlerinden bazılarını açıklamak gerekirse; araçların sınırlı kapasiteye sahip olma durumu kapasite kısıtlı araç rotalama, müşteri taleplerinin belirli zaman pencerelerinde karşılanması durumu zaman pencereli araç rotalama, talep noktalarının ihtiyaçlarının karşılanması için birden çok depodan hizmet verilmesi durumu çok depolu araç rotalama, talep noktalarının bazı ürünleri tekrar göndermesi yani mevcut araçlar ile hem dağıtım hem geri alma işleminin yapılması durumu dağıtımlı ve toplamamalı araç rotalama, aynı rota içerisinde hem dağıtım hem de geri toplama işleminin yapılması durumu geri toplamalı araç rotalama problemi olarak sınıflandırılabilir. Araç rotalama probleminde yer alan müşteri talep bilgisi, seyahat süresi ve müşteri sayısı gibi bilgilerin önceden bilinmesi probleme deterministik veya rastgele olması durumunda ise stokastik bir özellik sağlayacaktır.

Literatürde, araç rotalama problemleri geniş çapta tartışılmış ve klasik araç rotalama problemlerinin çeşitli türevleri incelenmiştir. Literatürde en çok incelenen, en popüler araç rotalama problemi türü ise kapasite kısıtlı araç rotalama problemidir.

Standart araç rotalama problemine kapasite kısıtının eklenmesi sonucunda kapasite kısıtlı araç rotalama problemi elde edilir. Kapasite kısıtlı araç rotalama probleminde her bir yayın eşit kapasiteye sahip olduğu kabul edilir ve planlama periyodunda araçların kapasitesi bilinmektedir.

Araç rotalama probleminin bir versiyonu olan kapasite kısıtlı araç rotalama, araç kapasitelerini dikkate alarak rotalama işleminin yapılması olarak tanımlanabilmektedir. Problemin tanımı incelendiğinde; $V = \{0, 1, \dots, n\}$ 0 noktası depo olmak üzere diğer noktalar müşterileri temsil etmektedir, her $\{i, j\}$ elemanı E , 0'dan büyük c_{ij} maliyetine sahiptir ve her müşteri $i \in V' = V \setminus \{0\}$ için d_{ij} talebi mevcuttur. $C = \{1, \dots, m\}$ Q kapasitesine sahip araçlar kümesidir. Kapasite kısıtlı araç rotalama problemi aşağıdaki kısıtları dikkate alarak m rotanın oluşmasını hedeflemektedir;

- Her rota depoda başlar ve depoda bitmeli,
- Bütün talepler karşılanmalı,
- Araç kapasitesi aşılmamalı,
- Her müşteriye tek bir araç tarafından gidilmeli,

- Toplam maliyetler minimize edilmelidir.

Bu problemin rota süre kısıtı da içeren farklı versiyonları da mevcuttur. Bazı durumlarda her bir $\{i, j\} \in E$ ikilisi için t_{ij} seyahat süresi ve her bir müşteri ($i \in V'$) için s_i hizmet süresi kısıtları olabilmektedir

Kapasite kısıtlı araç rotalama ile ilgili literatürde yer alan veri setleri incelenmiş, veri setleri ile ilgili detaylı analizler gerçekleştirilmiş ve daha kapsamlı olduğu belirtilen 100 ile 1000 talep noktası arasında değişen yeni veri seti (dataset) önerisi gerçekleştirilmiştir (Uchoa vd., 2017).

Soonpracha vd. (2014), girdi verileri, veri özellikleri, karar verme yaklaşımları ile sezgisel ve meta sezgisel algoritmalar dahil olmak üzere heterojen kapasiteli araç rotalama problemine ilişkin kapsamlı bir sınıflandırma ve literatür taraması gerçekleştirmişlerdir.

Rotada yer alan son müşteri talebi karşılandıktan sonra araçların depoya dönmesinin gerekmediği problemler kapasite kısıtlı araç rotalama probleminin bir versiyonu olan açık uçlu araç rotalama problemi olarak sınıflandırılmaktadır. Açık uçlu araç rotalama problemlerinde, araçlar rotalarına depodan başlar ve depodan son müşteriye doğru bir hareket gerçekleşmektedir.

Açık uçlu araç rotalama probleminin tanımı ilk olarak araç rotalama problemlerinin temel özelliklerinin sınıflandırılmaya çalışıldığı bir çalışmada (Schrage, 1981) yapılmış olsa da bu problem türüne ilişkin uygulama ilk olarak dağıtım yönetimi problemi hakkında yazılan, sınıflandırma ve rotalama olmak üzere iki aşamalı sezgisel bir algoritma kullanılan makalede gerçekleştirilmiştir. Açık uçlu rotalama probleminin tanımı çok önceden yapılmış olmasına rağmen bu konuda literatürde yer alan çalışma sayısı kısıtlıdır (Sariklis ve Powell, 2000).

Brandão (2004), tabu arama algoritmasını kullanarak açık uçlu rotalama problemine çözüm sağlamıştır ve önerdiği metodun Sariklis ve Powell (2000) tarafından önerilen algoritmadan daha iyi performans sergilediği ifade edilmiştir. Açık uçlu araç rotalama probleminin çözümü için değişken komşu arama sezgiseli (Fleszar vd., 2009), benzetilmiş tavlama algoritması (Vincent ve Lin, 2015), tabu arama algoritması (Fu vd. 2005; Derigs ve Reuter, 2009) ve doğadan esinlenen bir sürü zeka optimizasyon

algoritması olan bombus arısı eşleşme algoritması (Marinakis ve Marinaki, 2014) da kullanılan diğer çözüm yöntemlerindedir. Birbirinden farklı kapasiteye sahip araçlardan oluşan heterojen filonun açık uçlu araç rotalama problemi için kemik rota meta sezgisel algoritması kullanılmıştır (Yousefikhoshbakht vd., 2014).

Gazete dağıtım süreçlerindeki maliyetlerin azaltılması amacıyla değişken komşu arama (VNS) algoritması kullanılarak Türkiye özel bir medya şirketinde uygulama yapılmıştır (Şevkli ve Güler, 2017). Sezgisel algoritmalar ile ilgili çalışmalar olmasına rağmen kesin çözüm yöntemlerinin yer aldığı çalışma sayısı ise oldukça azdır (Letchford vd., 2007; Pessoa vd., 2008).

Çok depolu araç rotalama problemi, hareketlerine farklı depolardan başlayan araçların hareketlerini başladığı depoda bitirdiği araç rotalama probleminin özel bir versiyonudur (Golden vd., 2008). Çok depolu araç rotalama problemi ile ilgili literatürde yer alan genetik algoritma kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalardan oluşan bir literatür çalışmayı yapılmıştır (Karakatič ve Podgorelec, 2015). Çok depolu araç rotalama probleminde araçların heterojen kapasiteye sahip olduğu araç rotalama problemi revize edilmiş sezgisel genetik algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bolanos vd., 2018).

Çok depolu açık uçlu araç rotalama problemi ilk olarak Atina'da depodan müşterilere (kasap dükkanlarına) taze et dağıtım ağında maliyetlerin azaltılması amacıyla gerçekleştirilmiş ve meta sezgisel bir algoritma olan liste bazlı eşik kabul algoritması (LBTA) kullanıldığı bir çalışmada ele alınmıştır (Tarantilis ve Kiranoudis, 2002). Çok depolu açık uçlu araç rotalama probleminin çözümü için çoklu komşu arama algoritması ile tabu arama algoritmasından oluşan hibrit bir algoritma önermiştir (Soto vd. (2017)). Bu problem türü için en uygun rotanın bulunmasıyla seyahat süresinin minimize edilmesi amacıyla karmaşık tamsayılı matematiksel model ve hibrit genetik algoritmadan oluşan çalışma Liu vd. tarafından 2014 yılında gerçekleştirilmiştir. Liu tarafından önerilen matematiksel modelden çözüm kalitesi ve hesaplama hızı olarak daha iyi performans gösteren ve ayrıca alt tur eliminasyon kısıtlarında iyileştirmenin de yapıldığı karmaşık tamsayılı programlama modeli önerilmiştir (Lalla- Ruiz vd., 2016). İlerleyen yıllarda bu problemin çözümü için adaptif büyük komşu arama algoritması (ALNS) önerilmiştir (Lahyani vd., 2019).

Açık uçlu araç rotalama probleminde yer alan rotalarda depodan son müşterilere doğru olan akışın, son müşteriden depoya doğru olması durumunda bu problem tersine açık uçlu araç rotalama problemi (Reversed Open Loop Vehicle Routing Problem – ROVRP) olarak adlandırılır.

Her bir aracın başladığı depoya geri döndüğü çok depolu araç rotalama problemi için klasik üç indeksli matematiksel model Golden vd. (1977) tarafından önerilmiştir. Ramos vd. (2020) tarafından ise önerilen matematiksel model revize edilmiş ve dört farklı alt tur eliminasyon kısıtlarının (Dantzig–Fulkerson–Johnson kısıtı, Miller–Tucker–Zemlin kısıtı, transit yük kısıtlaması ve varış zamanı kısıtlaması) performansı değerlendirilmiştir. Bu tez kapsamında, başlangıç noktasından (sanal depo) ana depoya doğru hareketin olduğu ve rotanın ana depoda sona erdiği (başlangıç noktasına geri dönüşün olmadığı) çok depolu tersine açık uçlu ve heterojen kapasiteli araç rotalama problemi için, üç indeksli matematiksel model (MDROL – HFS VRP) ve büyük boyutlu problemlerde kullanılması amacıyla CW Tasarruf Algoritması'nın revize edilmiş versiyonu olan Rassal İteratif MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması geliştirilmiştir.

1.2. DİNAMİK ARAÇ ROTALAMA

Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) ve Coğrafi Bilgi Sistemi (GIS) teknolojilerinin aktif kullanımın sağlandığı teknolojik altyapı ve ürünlerdeki gelişmelerle birlikte şirketler filolarını gerçek zamanlı, maliyet etkin olarak takip edebilmekte ve yönetebilmektedir. Çevresel parametrelerin şirket filolarına olan etkisi göz önüne alındığında, filo yönetiminde statik yapılardan çok dinamik yapıların olduğu gözlemlenmektedir. Dinamik araç rotalama probleminin gerçek hayat uygulama alanlarının çok olması ve günümüz teknolojilerinin bu problemlerin çözümüne imkan tanıyabilmesi nedeniyle dinamik araç rotalama problemleri son dönemde ilgi odağı haline gelmiştir. Operasyonel maliyetlerin azaltılması, müşteri hizmetlerinin iyileştirip memnuniyet düzeyinin artırılması ve çevresel etkinin azaltılması amacıyla dinamik araç rotalamanın yapılması ihtiyacı bulunmaktadır. Express kurye alma veya teslimat ile ambulans gibi acil sağlık hizmetlerinde araçların anlık, dinamik ve hızlı olarak yönlendirilmesi önemlidir.

Statik araç rotalama problemlerinde “planlı talepler” için rotalama başlamadan önce planlama tamamlanır ve “ani” ortaya çıkan talepler rotalama esnasında dikkate alınmaz. Dinamik araç rotalama problemlerinde ise “plansız talepler” dikkate alınarak araçların rotaları değişebilir.

Statik araç rotalama problemi ile dinamik araç rotalama arasındaki en temel fark, statik araç rotalama probleminde girdi verileri sabitken, dinamik araç rotalama probleminde girdi verilerinin zaman içerisinde sürekli olarak değişebilmesidir (Psaraftis, 1988).

Psaraftis (1988), statik ve dinamik araç rotalama problemlerini karşılaştırmış ve arasındaki temel farkları on iki madde ile detaylandırmıştır. Kullanılması gereken çözüm teknikleri ve bilgi işleme mimarileri üzerinde etkisi olan bu farklılıkların ifade edildiği maddeler aşağıdaki gibidir;

- Zaman boyutunun önemi
- Problemin açık uçlu olması
- Gelecekteki bilgilerin kesin olmaması veya bilinmemesi
- Yakın zamanda gerçekleşen olayların daha önemli olması
- Bilgi güncelleme mekanizmasının gerekliliği
- Yeniden sıralama ve yeniden atama kararlarına izin verilmesi
- Daha hızlı hesaplama sürelerinin gerekliliği
- Erteleme mekanizmalarının gerekliliği
- Amaç fonksiyonlarının farklı olması
- Zaman kısıtlarının farklı olması
- Araç filo kapasitesini değiştirme esnekliğinin düşük olması
- Kuyruk oluşturma konusunun önemi

Dinamik araç rotalama probleminin statik araç rotalamadan farkı; dinamik araç rotalamada herhangi bir zaman zarfında gelebilecek müşteri talebi sisteme dahil edilerek gerekli olduğu aşamada başlangıç rotalarının revize edilip minimum maliyetle müşteri taleplerinin karşılanmasına imkan sunan rotaların oluşturulmasıdır.

Statik araç rotalama problemlerine literatürde çok fazla önem verilmesine rağmen; değişen müşteri talepleri, araç arızaları, belirsiz seyahat ve hizmet süreleri gibi değişkenler gerçek hayat problemlerine dinamiklik getirmektedir (Pillac vd. 2013).

Psaraftis (1988) statik rotalama problemini “yeniden optimize edilmeyen ve gerçek zamanlı olarak değişmeyen girdilerden belirli bir formülasyonun çıktısı olarak önceden hesaplanarak planlanmış rotalar” olarak ifade ederken, Larsen (2000) ise dinamik araç rotalama problemini “çıkıntının bir dizi rota seti değil gerçek zamanlı olarak değişebilen girdilerin bir fonksiyonu olarak rotaların nasıl oluşturulmasının gerekliliğini belirleyen bir politika” olarak tanımlamaktadır. Yeni bir talebin ortaya çıktığı an “t”, “0” başlangıç zamanından sonraki bir “gerçek zaman” olarak ifade edilmektedir. Rotalamanın yapıldığı ve şartların dinamik olarak değişebildiği gerçek zamanlarda operasyonların kolayca durdurulamaması ve kontrol parametrelerinin çok olması nedeniyle efektif kararların alınması zorlaşmaktadır. Bu durumda dinamik araç rotalama problemleri ile hızlı ve yüksek doğruluk oranında aksiyon alınma ihtiyacı bulunmaktadır.

Problem girdilerinde zamana bağlı değişim olması durumu araç rotalama problemine dinamiklik özelliği sağlamaktadır. Dinamik araç rotalama; optimal çözümü planlama sürecine başlamadan önce rotalama problemine ait bilgilerin tamamının bilinmediği problem türüdür. Dinamik araç rotalamada planlama esnasında yeni bilgilerin gelebileceği gibi bilinen bilgilerde de değişim olabilmesi söz konusudur. Girdi verilerinin iki önemli boyutu değişim ve bilgi kalitesi olarak ifade edilmektedir. (Psaraftis, 1980). Değişim, mevcut bilgilerin rotalama esnasında bile değişebileceğini ifade ederken; bilgi kalitesi ise mevcut verilerdeki olası belirsizlikleri yansıtmaktadır. Her iki boyutta da ortak olan nokta ise belirsiz, kısmen bilinen veya bilinmeyen girdi parametrelerinin, rotalama ile eşzamanlı olarak ortaya çıkması ve güncellenmesidir. Dinamizmi ve belirsizliği efektif bir şekilde yönetebilmek için dinamik araç rotalama problemine ve çözüm araçlarına olan ihtiyacın önemi giderek artmaktadır.

Dinamik araç rotalama, orijinal optimize edilmiş statik rotalama planının yürütülmesi esnasında sistemin bozulmasına ve yeniden optimize edilmesine sebep veren dinamik taleplerin oluşması durumu olarak ifade edilmektedir (Ercan ve Gencer, 2018). Dinamiklik kaynağı; müşteri taleplerindeki değişimler, yeniden rotalama ve araç bozulmalarından kaynaklı seyahat süresi ve mesafelerinde artış olarak ifade edilmektedir.

Tarihsel olarak incelendiğinde dinamik araç rotalama ile ilgili ilk çalışmanın, merkezi olmayan istasyonlar arası rota planlama (telefon hattı) probleminin dinamik versiyonuna dinamik programlamaya dayalı yeniden optimizasyon algoritmasını uygulayan Psaraftis

(1980) tarafından yapıldığı ifade edilse de dinamik araç rotalamaya yönelik ilk atıfta bulunan çalışmanın Wilson ve Colvin'in (1977) ABD (Rochester, NY)'de çevirmeli arama hizmeti ilgili yaptıkları ve MIT teknik raporunda yayımladığı çalışmadır.

Dinamik araç yönlendirme sistemleri ve sınıflandırmaları hakkında daha detaylı bilgi için Larsen vd. (2007) tarafından yapılan çalışma incelenebilir.

Pillac vd. (2013), dinamik araç rotalama problemi ile ilgili 1980 – 2011 yılları arasında yayınlanan 154 çalışmayı içeren kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir.

Toth ve Vigo'nun (2014) kitabındaki bir bölümde, 161 makalenin incelendiği bir çalışma yer almaktadır (Bektaş vd., 2014). Bu makalede, büyük bir oranı Pillac vd. (2013) tarafından incelenen çalışmada yer alan makalelerden oluşan detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

1980 – 2014 yılları arasında dinamik araç rotalama ile ilgili yayınlanan 117 çalışmanın; problem türü, lojistik kapsam (P/D), ulaşım yöntemi, amaç fonksiyonu, filo büyüklüğü, zaman kısıtı, araç kapasite kısıtı, müşterileri reddetme özelliği, dinamik kaynağı, stokastiklik kaynağı ve çözüm metodu olmak üzere 11 kriter altında gruplandırıldığı, detaylandırıldığı bir çalışma Psaraftis vd. tarafından 2016 yılında gerçekleştirilmiştir (Psaraftis vd., 2016).

Dinamik araç rotalama probleminde en yaygın incelenen dinamik olay, yeni müşterilerin gelişidir; ancak talep, hizmet ve seyahat süresindeki değişiklikler de diğer dinamik unsurlar olarak tanımlanmaktadır. Dinamik ve stokastik araç rotalama problemleri ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalardan oluşan kapsamlı bir literatür çalışması, bu çalışmaların sınıflandırılması (seyahat süreleri, talepler, müşteriler) ve değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir (Ritzinger, 2016).

Günlük hayattaki deneyimlerimiz ile önemini anladığımız, geniş uygulama alanına sahip olması ile de ön plana çıkan, literatürde yoğun bir şekilde araştırılan dinamik araç rotalama problemlerinin optimizasyonu ve yaklaşık çözümünün elde edilebilmesi için hem kesin hem de (meta) sezgisel birçok algoritma mevcuttur (Ercan ve Gencer, 2018; Braekers vd., 2016; Psaraftis vd., 2016).

İnsansız Hava Araçlarının görev etkinliğinin artırılması ve en az maliyetle dinamik rotalamasının yapılması için literatürde yer alan çalışmaların ve çözüm yaklaşımlarının incelendiği bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. İnsansız hava aracı filolarının dinamik rotalanması amacıyla karar destek sistemi geliştirmişlerdir (Ercan ve Gencer, 2013; Ercan ve Gencer, 2018).

Dinamik araç rotalama problemlerinin çözümünde bilgisayarların hızı ve algoritmanın kısa sürede sonuç vermesi önem arz etmektedir. Dinamiklik derecesi dinamik rotalama problemlerinde dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Araç rotalama optimizasyon problemlerinin karmaşıklığı ve mevcut hesaplama sınırlamaları nedeniyle optimal bir çözüm bulmak için uzun süreler gerekebilmektedir. (Bu süre saatler hatta bazen günler sürebilmektedir) (Toth ve Vigo, 2014).

Dinamik araç rotalama problemlerinde, t (time) zamanında müşterilerden gelecek dinamik talep sıklığı, problemin çözümüne etki etmektedir ve sistemin dinamiklik derecesini ölçmek için literatürde en aygın kullanılan yöntem Lund vd. tarafından geliştirilen denklemdir. Bu denklem; Degree of Dynamism = $\frac{n_d}{n_{tot}} * 100$ olarak ifade edilmektedir. Dinamik talep miktarı n_d , toplam talep sayısı ise n_{tot} olarak belirtilmektedir (Lund vd., 1996).

Gendreau vd. (1999), kurye hizmetinde gerçek zamanlı müşteriler için esnek zaman penceresi kısıtlamalı dinamik araç rotalama çalışması gerçekleştirmiştir.

Azi vd. (2012) yapmış oldukları çalışmada, dinamik olarak oluşan müşteri taleplerinin kabul veya reddini değerlendirmektedir. Dinamik talebin o anki bir rotaya atanması veya çalışma saatleri içerisinde ilerleyen bir zamanda talebin karşılanmasına karar verildiği, Adaptif Büyük Komşu Arama (ALNS) sezgisel algoritmasının kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Araçların ilgili rotaya başlamasından sonra oluşan taleplerin dikkate alındığı teslimat ve teslim alma problemleri için meta sezgisel Karınca Koloni Optimizasyon (ACO) algoritması kullanılarak bir çözüm önerisi geliştirilmiştir (Euchi, 2015). Aynı yıl içerisinde Karınca Koloni Optimizasyon algoritması kullanılarak benzer bir çalışma daha yapılmıştır (Mavrovouniotis ve Yang, 2015). Belirsiz hizmet süresini dikkate alarak; hizmet edilen müşteri sayısının maksimize edilmesi ve müşteri bekleme süresinin

minimize edilmesi amacıyla Bulanıklık Karınca Kolonisi (FACO) algoritması kullanılmıştır. (Kuo vd., 2016) Liege Havaalanı'nda dinamik taleplerin de dikkate alınarak ihtiyacın mümkün olan en kısa sürede karşılanması amacıyla, yakıt doldurma kamyonlarının dinamik araç rotalama için Karınca Kolonisi Optimizasyon algoritmasının kullanıldığı bir uygulama gerçekleştirilmiştir (Schyns, 2015). Aynı algoritma ile İsviçre'nin Lugano kentinde bir uygulama gerçekleştirilmiştir (Montemanni vd., 2005). Revize edilmiş Karınca Kolonisi Optimizasyon algoritmasıyla dinamik araç rotalama problemlerine çözüm aranmıştır (Xiang vd., 2020). Karbondioksit emisyon miktarının azaltılması amacıyla Karınca Kolonisi ve Büyük Komşu Arama algoritmalarından oluşan hibrit bir algoritma önerilmiştir (Messaoud, 2018).

Dinamik talepler dikkate alınarak araç rotalama işleminin gerçekleştirilmesi için Değişken Komşu Arama (VNS) algoritmasının kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında ayrıca matematiksel bir model de önerilmiştir (Sarasola, 2016). Değişken Komşu Arama ve Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) algoritmalarının performansının karşılaştırıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Khouadja vd., 2012). İki fazlı çoklu Parçacık Sürü Optimizasyon algoritması (2MPSO) kullanılarak dinamik araç rotalama çalışması gerçekleştirilmiştir ve etkinliği analiz edilmiştir (Okulewicz ve Mańdziuk, 2017). Dinamik araç rotalama probleminin çözümünde Adaptif Büyük Komşu Arama sezgisel algoritmasının kullanımı da gözlemlenmektedir (Chen vd., 2018). Sürekli arama alanında dinamik araç rotalama problemini çözmek için meta sezgisel Parçacıklı Sürü Optimizasyon algoritması ile Diferansiyel Evrim (DE) algoritması kullanılmıştır (Okulewicz ve Mańdziuk, 2019).

Kendinden uyarlamalı evrimsel bir algoritma ile trafik sıkışıklığı olan dinamik araç rotalama problemlerine çözüm aranmıştır. Dinamik değişikliklere etkin bir şekilde uyum sağlanabilmesi amacıyla arama süreci esnasında parametre değerleri, operatör türleri, operatör kombinasyonları ve operatör çağırma sırasını içeren bir dizi konfigürasyondan oluşan kendinden uyarlamalı bir algoritma önerilmiştir (Sabar vd., 2019). Genetik Algoritma (GA) ve Yerel Arama (LS) algoritmalarından oluşan evrimsel bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir (Ouertani vd., 2018).

Zamana bağlı seyahat süreleri bulunan dinamik araç rotalama problemi için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Farklı kapasitelere sahip birden çok araç ile gerçek

zamanlı hizmet talepleri ve talep düğümleri arasındaki seyahat sürelerindeki gerçek zamanlı değişimler dikkate alınarak, teslim alma ve teslim etme araç rotalama problemleri için esnek zaman pencereci rotalama Genetik Algoritması önerilmiştir (Haghani ve Jung, 2005).

Dinamik araç rotalama için iki aşamalı bir yapı önerilmiştir. Birinci aşamada, araç atama işlemi için süpürme yöntemi uygulanmıştır. İkinci aşamada ise gerçek zamanlı bilgiler dikkate alınarak rota revizyonu ve iyileştirmesi için Tabu Arama (TS) algoritması uygulanmıştır. Geliştirilen algoritma 50 düğümden oluşan bir ağa ve Taichung şehrine uygulanmıştır (Liao ve Hu, 2011).

Abdirad vd. araç kapasitelerinin aşılmadan toplam seyahat maliyetinin minimize edilmeye çalışıldığı, dinamik araç rotalama probleminin çözümü için iki aşamalı meta sezgisel bir algoritma önermiştir (Abdirad vd., 2021).

Dinamik eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemlerinde, dinamik taleplerin dolaşımında yer alan araçlar tarafından karşılanabilmesine imkan tanıyan matematiksel bir model ve sezgisel rassal iteratif Yerel Arama Değişken Komşu İniş (LSVND) algoritması önerilmiştir (Aydoğdu ve Özyörük, 2020).

1.3. SEZGİSEL CLARKE & WRIGHT TASARRUF ALGORİTMASI

Clarke ve Wright 1964 yılında, genellikle klasik araç yönlendirme problemi olarak adlandırılan Dantzig ve Ramser tarafından ele alınan araç rotalama probleminin çözümü için bir algoritma geliştirmişlerdir (Clarke ve Wright, 1964). Bu algoritmada bir adet depo ve birden fazla talep noktası bulunmaktadır. Temeli tasarruf kavramına dayanan Clarke & Wright Tasarruf Algoritması sezgisel ve buluşsal bir algoritmadır. Araç rotalama problemine kesin olarak optimal çözümü sağlamamaktadır; ancak literatürde yaygın bir şekilde kullanıldığı bilinmektedir. Standart CW tasarruf algoritmasında kullanılan tasarruf formülü $S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij}$ olarak ifade edilmektedir.

Kapasite kısıtlı araç rotalama problemleri NP-zor problemlerdir ve bu nedenle bu problemlerin çözümü için çeşitli sezgisel ve meta sezgisel algoritmalar geliştirilmekte, önerilmekte ve kullanılmaktadır. Araç rotalama problemlerinde temel amaç, en az

mesafeli rota belirlenmesi ve mevcut araç sayısı ile en kısa sürede talep noktalarına ait ihtiyaçların karşılanmasıdır. Bu çalışmada ise sezgisel ve geliştirilmeye açık bir algoritma olan Clarke & Wright tasarruf algoritması kullanılmaktadır.

Rand (2009), tarafından Clarke & Wright Tasarruf Algoritması ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar ve bu çalışmaların uygulama alanlarının yer aldığı literatür taraması çalışması gerçekleştirmiştir.

Zaman içinde, standart Clarke & Wright (CW) tasarruf formülüne yeni parametrelerin ve varsayımların dahil edilmesi, mevcut parametrelerin değiştirilmesi ve çıkarılması ile çeşitli versiyonlar geliştirilerek rota hesaplama süresi hızlandırılmaya ve çözüm kalitesi iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Girard vd. (2005), tasarruf algoritmasının farklı bir versiyonunu geliştirmiş ve geliştirilen bu algoritma ile literatürde yer alan farklı test problemlerinde daha iyi sonuçlar elde edildiği ifade edilmiştir. Doyuran (2008) da ek bir hesaplama yükü getirmeden çözüm kalitesini arttırmak için, Clarke & Wright tasarruf formülünün iki ve üç terimli versiyonlarının performansını arttıran çeşitli yaklaşımlar önermiştir.

Birden fazla deponun olması durumunda Clarke & Wright Tasarruf Algoritması'nın uygulanması zorlaşmaktadır. Çok depolu araç rotalama problemini, Clarke & Wright Tasarruf Algoritması'na yeni parametreler ekleyerek çözmek için, ilk olarak Tillman (1969) tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İlerleyen yıllarda Tillman ve Cain (1972), m adet deponun olduğu, her deponun k ve her müşterinin i gösterimiyle ifade edildiği bir problemde tasarruf değerlerinin hesaplanmasını $S_{ij}^k = C_i^k + C_j^k - C_{ij}$ formülünü kullanarak gerçekleştirmiştir.

Literatürde açık uçlu araç rotalama problemini çözmek için Clarke & Wright Tasarruf Algoritması kullanan için çok az sayıda çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalardan, Bodin vd. (1983) i ve j talep noktaları arasındaki tasarruf değerinin hesaplanması için $S_{ij} = C_{0j} - C_{ij}$ formülünü kullanmışlardır. Gaskell (1967) ve Yellow (1970) tarafından iki müşteri arasındaki mesafenin göreceli öneminin kontrol edilebilmesi için Lamda (λ) parametresi (route shape parameter) sunulmuştur ve tasarruf değerlerinin hesaplama formülünü $S_{ij} = C_{0i} + C_{j0} - \lambda * C_{ij}$ şeklinde değiştirmiştir.

Lambda parametresinin değeri arttıkça müşterilerin depoya olan uzaklıklar yerine müşteriler arasındaki mesafeye daha fazla önem verilmektedir. Lambda parametresinin kullanımında akla gelen ilk soru λ değerinin ne olduğu ve problemlerde hangi λ değerinin kullanılacağıdır. McDonald (1972) herhangi sabit bir λ değeri ile optimumdan uzak bir sonuç elde edilebileceğini ifade etmiştir.

Paessens (1988), asimetrik yol uzaklıklarının bulunduğu kapasite kısıtlı problemlerde maksimum tasarruf değerinin hesaplanabilmesi için μ ağırlık parametresini formüle dahil etmiş ve formülü $S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - \lambda * C_{ij} + \mu | C_{0i} - C_{j0} |$ olarak revize etmiştir.

Vigo (1996), asimetrik yol yapısının bulunduğu kapasite kısıtlı problemlerinin çözümü için Clarke & Wright tasarruf algoritmasının uygulamasını gerçekleştirmiştir.

Pichpibul ve Kawtummachai (2013) standart Clarke & Wright tasarruf algoritmasına ait formülün değiştirilmesi, açık rota yapımı, iki aşamalı seçim, rota sonrası iyileştirme olmak üzere 4 aşamalı yenilemeli bir geliştirme yöntemi kullanmışlardır.

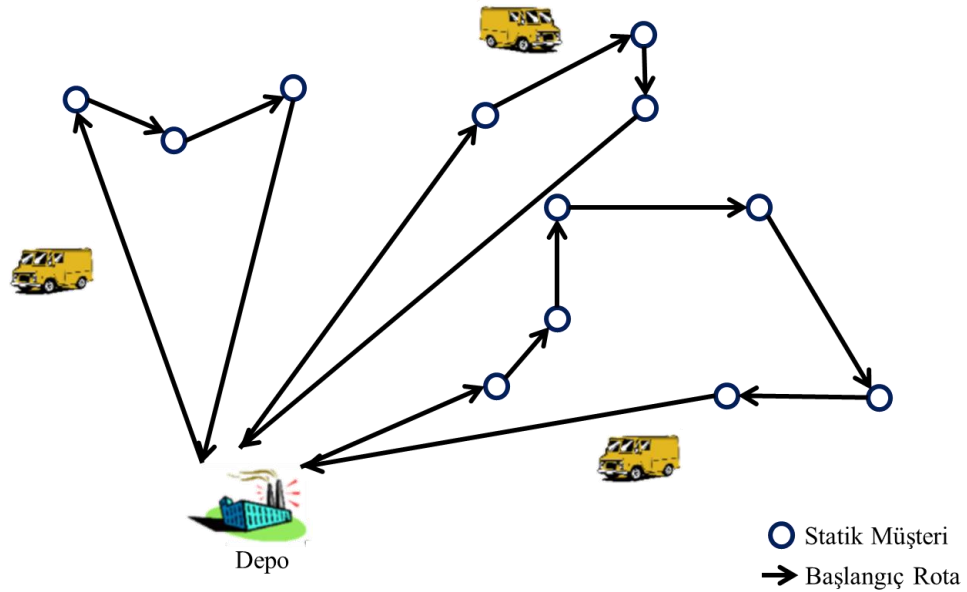
Belirli bölgelerde oturan öğrencilerin en uygun şekilde servis araçlarına atanıp, servis araçlarının da kendi içerisinde en kısa sürede, en uygun rota ile farklı okullara hizmet verebilmesini sağlayan, açık uçlu kapasite kısıtlı servis rotalama probleminin çözümü için Clarke & Wright sezgisel algoritmasının revize edilmiş versiyonu ile yeni bir yaklaşım sunmuştur (Albayrak, 2019). Çalışmanın kesin çözüm yönteminde önce kümeleme sonrasında rotalama yaklaşımı benimsenmiştir.

Dinamik araç rotalama probleminin çözümünde kullanılan ve bu tez kapsamında geliştirilmiş revize edilmiş CW tasarruf algoritmasında (MDROL – HFS VRP) kullanılan tasarruf formülü $S_{kij} = C_{kj} - \lambda * C_{ij} + \text{surplus}$ (k: depo, i, j talep noktaları) ile her bir araç (depo) ile talep noktaları arasındaki tasarruf değerleri hesaplanmıştır.

2. BÖLÜM

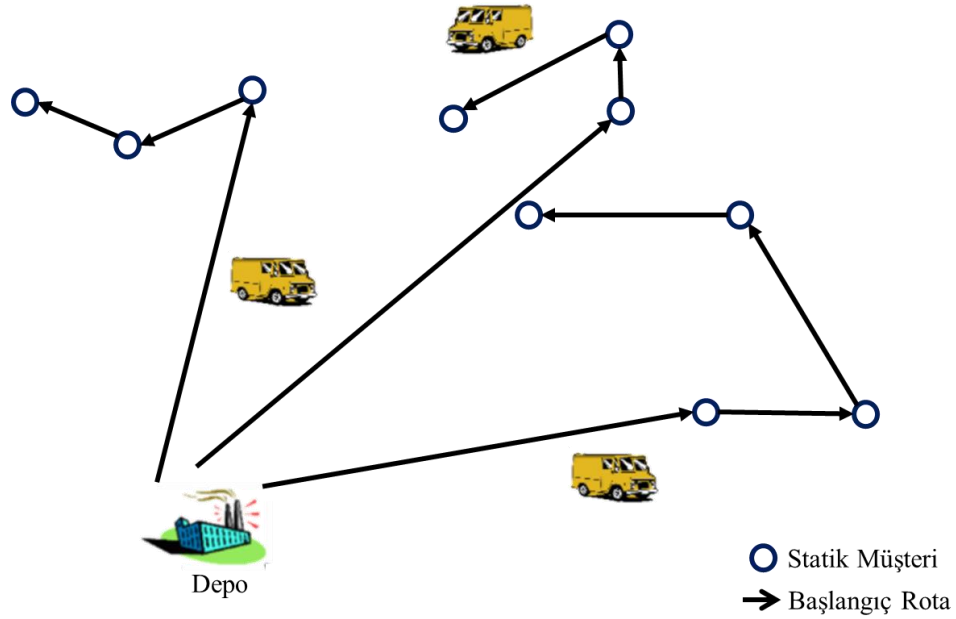
DİNAMİK ARAÇ ROTALAMA

Belirli bir kapasiteye sahip araçlarla, bir depodan başlayıp tekrar başlangıç deposunda sona eren rotalama problemleri kapasite kısıtlı araç rotalama problemleri olarak adlandırılmaktadır. Bu problem türünde araçlar turuna bir depoda başladıktan sonra güzergahını tamamlayıp tekrar aynı depoda görevini sonlandırmaktadır. Bu sebeple de kapasite kısıtlı araç rotalama problemleri, rotalama durumlarına göre, kapalı uçlu araç rotalama problemi olarak da adlandırılabilir. Kapasite kısıtlı araç rotalama problemi Şekil 1’de örneklendirilmiştir.



Şekil 1. Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama

Klasik araç rotalama probleminin bir versiyonu olan açık uçlu araç rotalama problemi ise turlarına depodan başlayan araçların son talep noktasına hizmet ettikten sonra depoya dönmediği problem türü olarak tanımlanmaktadır. Bu problem türünde başlangıç noktası ana depo, bitiş noktası ise talep noktasıdır. Açık uçlu araç rotalama problemine ait görsel Şekil 2’de yer almaktadır.

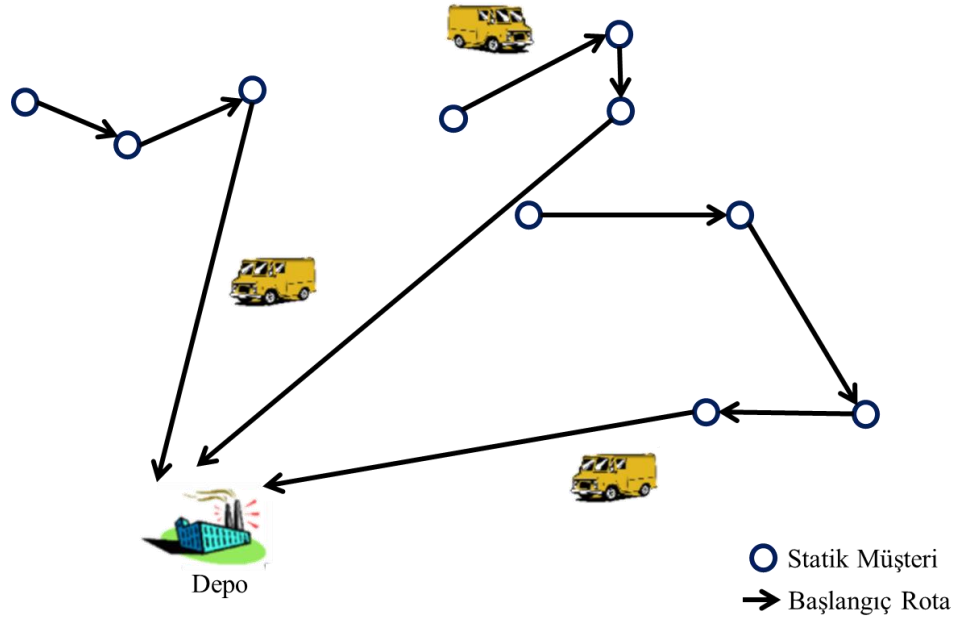


Şekil 2. Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi

Hiçbir dinamik talebin olmadığı ve tüm taleplerin önceden bilindiği araç rotalama problemleri, çevre durumuna göre statik problemler olarak isimlendirilmektedir. Dinamik araç rotalama problemlerinde ise tüm talepler önceden bilinmemekte olup araçlar statik talepler üzerinden rotalanıp ilgili güzergahlarında talepleri karşılamaktadır, ancak araçlar rota üzerinde ilerlerken önceden bilinmeyen veya tahmin edilemeyen dinamik bir talep gelmesi durumunda problem dinamik araç rotalama problemi olarak adlandırılmaktadır.

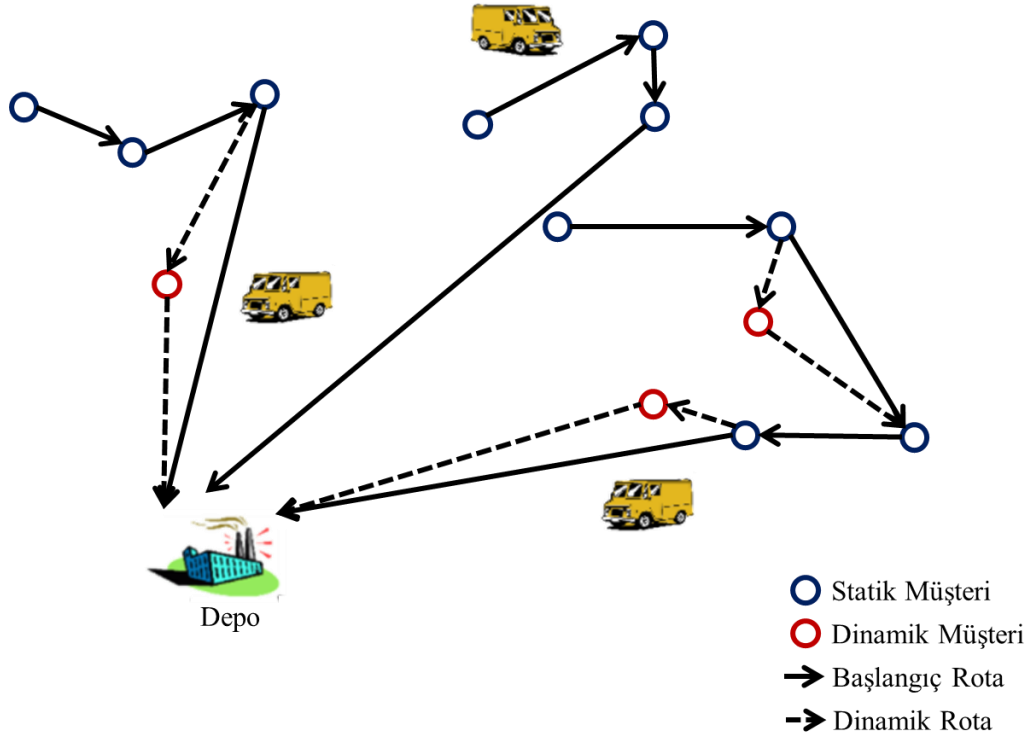
Bu çalışmada dinamik araç rotalama yapılacaktır. Statik müşteri talepleri dikkate alınarak planlama periyodu başlangıcında oluşturulan başlangıç rotaları üzerinde ilerleyen araçlar dinamik bir talep geldiği anda ana depodan farklı konumlarda ve birbirinden farklı kapasitelerde yer alacaklardır. Bu durumda problem Çok Depolu Tersine Açık Uçlu Heterojen Kapasiteli Araç Rotalama Problemine (MDROL – HFS VRP) dönüşecektir.

Tersine açık uçlu araç rotalama probleminde akış yönü açık uçlu araç rotalama probleminin aksi yönündedir. Bu problem türünde araç hareket yönü talep noktalarından ana depoya doğrudur ve Şekil 3’de bu durum gösterilmektedir. Başka bir deyişle turların talep noktalarından başlayıp ana depoda sona erdiği problem türleridir. Dinamik araç rotalama problemi olarak da adlandırılan bu problem türü için tez kapsamında matematiksel model ve sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir.



Şekil 3. Tersine Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi

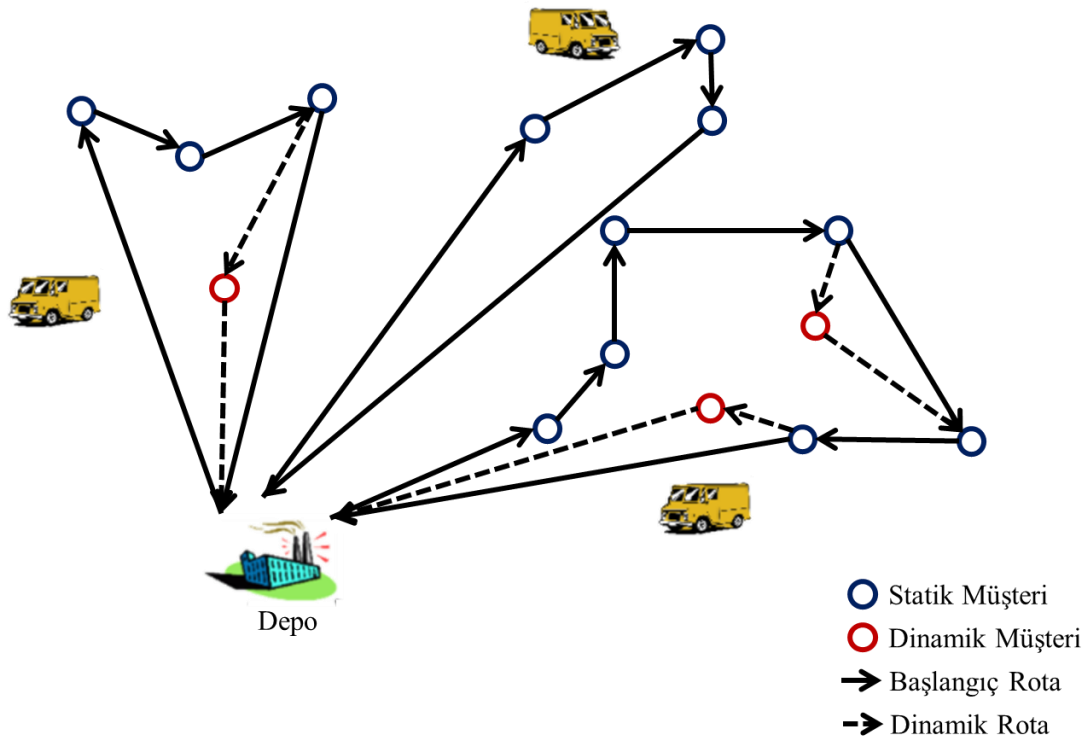
Herhangi bir t (time) anında dinamik talep geldiği durumda; hizmet edilmesi gereken statik müşteriler, t anında oluşan dinamik müşteriler, araçların başlangıç rotaları ve dinamik müşteriler dikkate alınarak oluşturulan dinamik rotalarını özetleyen görsel Şekil 4'da sunulmuştur.



Şekil 4. Çok Depolu Tersine Açık Uçlu Heterojen Kapasiteli Dinamik Araç Rotalama

Dinamik araç rotalama; planlama sürecine başlamadan önce rotalama problemine ait bilgilerin tamamının bilinmediği problem türüdür. Dinamik araç rotalamada planlama esnasında yeni bilgilerin gelebileceği gibi bilinen bilgilerde de değişim olabilmesi söz konusudur. Problem girdilerinde zamana bağlı değişim olması durumu araç rotalama problemine dinamiklik özelliği sağlamaktadır. Dinamik araç rotalama probleminin gerçek hayat uygulama alanlarının çok olması ve günümüz teknolojilerinin bu problemlerin çözümüne imkan tanıyabilmesi nedeniyle dinamik araç rotalama problemleri son dönemde ilgi odağı haline gelmiştir.

Hiçbir dinamik talebin yer almadığı statik talepler dikkate alınarak araç rotalamanın gerçekleştirildiği başlangıç rotası ve zaman içerisinde dinamik taleplerin meydana geldiği ve dinamik talepler dikkate alınarak araç rotalamanın yapıldığı ve dinamik rotaların da yer aldığı dinamik araç rotalama Şekil 5’de gösterilmektedir.



Şekil 5. Dinamik Araç Rotalama

Dinamik araç rotalama probleminin amacı müşteri taleplerinin her zaman minimum maliyetle en efektif şekilde karşılanabilmesidir. Dinamik araç rotalamanın klasik araç rotalama problemlerinden farkı, dinamik araç rotalamada herhangi bir t anında gelebilecek müşteri talebinin sisteme dahil edilerek ve gerekirse başlangıç rotalarının revize edilerek minimum maliyetle müşteri taleplerinin karşılanmasına imkan sunan rotaların oluşturulmasıdır.

Araç rotalama probleminin bir türü olan topla dağıt (pick up delivery) araç rotalama problemi genellikle tersine lojistik uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu problem türünde her bir müşterinin dağıtım ve toplama olmak üzere iki farklı talebi mevcuttur. Depodan araç yönlendirilmesi yapılarak müşterilerin dağıtım taleplerinin karşılanması faaliyeti linehaul, araçların müşterin toplama taleplerini karşılayıp depoya dönme faaliyeti ise backhaul olarak adlandırılmaktadır.

Dinamik araç rotalamanın yapıldığı bu problem türünde araçların hareket yönü açık uçlu araç rotalama probleminin akış yönünün tam tersi yönündedir. Yani bir başka deyişle; dinamik talep anında araçlar buldukları başlangıç noktasından (sanal depo) ana depoya doğru hareket etmekte ve rotalar ana depoda sonlanmaktadır. (Araçlar dinamik talep anında buldukları başlangıç noktalarına geri dönüş gerçekleştirilmemektedir.) Bu tez kapsamında gerçekleştirilen dinamik araç rotalama modeli sadece müşterilerden depoya doğru olan akış yönü itibarıyla backhaul problemine benzemekle birlikte hem yapısal hem de problem türü olarak farklıdır. Backhaul probleminde; müşteri toplama talepleri bilinmekte, araçlar tam kapasite ile depoda yer almakta ve hangi sıra ile toplama işlemini gerçekleştireceği rota planlama safhasında belirlenmektedir. Dinamik araç rotalama probleminde ise dinamik talep oluştuğu anda araçlar birbirinden farklı kapasiteler ile farklı konumlarda yer almaktadır ve dinamik taleplerin de bulunduğu müşteri kümesi için minimum maliyeti sağlayan dinamik rota kümesi elde dilmektedir.

Bu çalışmada, çok depolu tersine açık uçlu ve heterojen kapasiteli dinamik araç rotalama problemi için matematiksel model (MDROL – HFS VRP) ve Clarke & Wright sezgisel algoritmasının revize edilmiş versiyonu olan Rassal İteratif MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması geliştirilmiştir. Herhangi bir an da her bir dinamik talep oluşması durumunda, geliştirilmiş olan matematiksel model veya sezgisel algoritmanın çalıştırılması sonucunda minimum maliyetli güncel dinamik rota kümeleri elde edilir.

3. BÖLÜM

METODOLOJİ

Dinamik araç rotalama probleminin çözümü için kullanılan kesin çözüm yöntemleri ve geliştirilmiş sezgisel çözüm yöntemleri bu bölümde anlatılmaktadır. Dinamik araç rotalama probleminin modellenebilmesi için 2 aşamalı matematiksel model süreci gerekmektedir. Birinci model başlangıç çözümünün bulunmasına imkan tanıyan standart kapasite kısıtlı araç rotalama problemi matematiksel modelidir. Dinamik taleplerin geldiği durumlarda ise optimum rota kümesinin bulunabilmesi için yeniden araç rotalaması yapmak gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında dinamik rotalama yapılabilmesine imkan tanıyan Çok Depolu Tersine Açık Uçlu Heterojen Kapasiteli (MDROL – HFS) Araç Rotalama Problemi için dinamik araç rotalama matematiksel modeli geliştirilmiştir. Bu modelle dinamik araç rotalama yapılmaktadır.

Büyük boyutlu dinamik araç rotalama problemlerinde kesin çözüm yöntemi ile optimum sonuç elde edilmesinde çok uzun sürelere ihtiyaç duyulması nedeniyle hızlı çözüm sunabilen bir algoritma ihtiyacı bulunmaktadır. Bu kapsamda, bu çalışmada gerçekleştirilen ve literatüre sağlanan bir diğer katkı da sezgisel bir yöntem olan Clarke & Wright (CW) tasarruf algoritmasının dinamik rotalama probleminde kullanılabilmesine imkan tanıyan şekilde revize edildiği bir algoritmanın geliştirilmesidir. Büyük ölçekli dinamik modellerin çözülmesinin birinci aşamasında başlangıç çözümü elde edilmesi amacıyla kapasite kısıtlı araç rotalamaya imkan tanıyan standart Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritması kullanılmıştır. İkinci aşamasında ise dinamik talepler geldiğinde çalıştırılacak Rassal İteratif MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması geliştirilmiştir.

Bu bölümde ilk olarak problem tanımı ve varsayımlar, sonrasında dinamik araç rotalama problemlerine kesin çözüm yöntemi sunan matematiksel modeller ve son olarak da önerilen sezgisel algoritma yer almaktadır.

3.1. PROBLEM TANIMI ve VARSAYIMLAR

Araç rotalama problemlerinde ihtiyaç duyulan bilgiler planlamaya başlamadan önce bilinmekte ve planlama periyodu boyunca değişmemektedir. Ancak ihtiyaç duyulan

bilgilerin tamamının bilinmediği ve bir kısmının planlama periyodu süresince zamana bağlı olarak ortaya çıkma durumunun söz konusu olduğu araç rotalama problemi dinamik araç rotalama problemi olarak adlandırılır. Bu çalışma kapsamında, rotalama öncesinde bilinen statik talep noktaları dikkate alınarak rotalarına başlamış araçların güzergahları üzerinde ilerlerken zaman içerisinde oluşacak dinamik taleplerin olduğu durumda araç kapasitelerinin ve güncel taleplerin dikkate alınarak minimum maliyetli dinamik araç rotalamanın yapılması gerçekleştirilecektir.

Bu çalışmada ele alınan dinamik araç rotalama problemlerinin varsayımları aşağıdaki gibidir;

- Rotalamada eşit kapasiteye sahip özdeş araçlar kullanılmıştır,
- Araçların hızları eşittir ve saniyede 1 birim yol almaktadır,
- Rotalamanın başlangıcında araçlar ana depoda hazır olarak beklemektedir,
- Araçların çarpışma ve yollarda tıkanıklık durumu söz konusu değildir,
- Araçlarda bozulma meydana gelmemektedir,
- Hizmet edilmesi gereken ve dinamik müşteri talep miktarları rota üzerindeki araçların kalan kapasitesinden fazla olması durumunda ana depodan tüm talepleri karşılayacak kadar araç yönlendirmesi gerçekleştirilebilmektedir,
- Tüm rotaların bitiş noktası ana depo olacaktır,
- Araçlarda bulunan yük miktarları kalan araç kapasitesini aşmamalıdır,
- Dinamik talebin geldiği anda rotasını tamamlamış olan araçlar tam kapasite ile hizmet vermeye hazır olarak ana depoda beklemektedir,
- Her bir müşteri eşit önceliğe sahiptir,
- Yükleme ve boşaltma süreleri ihmal edilmiş ve dikkate alınmamaktadır.

3.2. KESİN ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Dinamik araç rotalamanın yapılması için 3.2.1 bölümünde dinamik araç rotalama problemi için başlangıç çözümü sunan standart kapasite kısıtlı araç rotalama problemine ait matematiksel modele, 3.2.2 bölümünde ise bu çalışma kapsamında geliştirilen Çok Depolu Tersine Açık Uçlu Heterojen Kapasiteli Araç Rotalama Problemine (MDROL – HFS VRP) ait dinamik araç rotalama matematiksel modeline yer verilmektedir.

3.2.1. Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama (CVRP) Matematiksel Modeli

Sabit kapasiteye sahip araçlarla tüm talep noktaları taleplerinin en kısa yol / en düşük maliyet ile karşılanması için optimum rota kümesinin bulunması amacıyla kullanılan matematiksel modeldir. Matematiksel model aşağıda yer almaktadır;

Kümeler

$N = \{1, \dots, n\}$ Düğüm kümesi

Parametreler

Q: Araç kapasitesi

V: Toplam Araç Sayısı

c_{ij} = i düğümünden j düğümüne gitme maliyeti

q_i = i . düğümün talep miktarı

$i = 1, i \in N$: Başlangıç Noktası

Karar Değişkeni

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ düğümünden } j \text{ düğümüne gidilirse} \\ 0, & \text{aksi taktirde} \end{cases}$$

u_i = Müşterilerin ziyaret edilme sıra karar değişkeni

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

s. t.

Kısıtlar

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \setminus 1 \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{i \in N \\ j \neq i}} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \setminus 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N \setminus 1} x_{1j} = V \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N \setminus 1} x_{i1} = V \quad (5)$$

$$u_i - u_j + Qx_{ij} + (Q - q_i - q_j)x_{ji} \leq Q - q_j \quad \forall i, j \in N, i \neq 1, j \neq 1, i \neq j, q_i + q_j \leq Q \quad (6)$$

$$u_i \geq q_i + \sum_{\substack{j \in N \setminus 1 \\ j \neq i}} q_j x_{ji} \quad i \in N, i \neq 1 \quad (7)$$

$$u_i \leq Q - (Q - \max\{q_i: i \neq j\} - q_i)x_{1i} - \sum_{\substack{j \in N \setminus 1 \\ j \neq i}} q_j x_{ij} \quad i \in N, i \neq 1 \quad (8)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (9)$$

$$u_i \geq 0 \quad \text{Tamsayı} \quad \forall i \in N \quad (10)$$

- (1) Toplam katedilen mesafe maliyetin minimizasyonu
- (2) Depo hariç her bir talep noktasından 1 çıkış bulunmalıdır.
- (3) Depo hariç her bir talep noktasına 1 geliş bulunmalıdır.
- (4) Depodan toplam araç sayısı (V) kadar çıkış olmalıdır.
- (5) Depoya toplam araç sayısı kadar geliş olmalıdır.
- (6) (7) (8) Alt tur eliminasyon kısıtı
- (9) (10) Karar değişkeni domain kısıtı

3.2.2. Çok Depolu Tersine Açık Uçlu Heterojen Kapasiteli Araç Rotalama Problemi (Multi Depot Reversed Open Loop with Heterogeneous Fleet Size Vehicle Routing Problem) MDROL – HFS VRP Matematiksel Modeli

Dinamik araç rotalama problemlerinde başlangıçta depoda yer alan araçlar, dinamik talep(ler) oluştuğu anda farklı kapasiteler ile farklı konumlarda yer almaktadırlar. Bu durumda kapasite kısıtlı araç rotalama problemi çok depolu tersine açık uçlu heterojen kapasiteli araç rotalama problemine dönüşmektedir.

Bu problem literatürde yer alan çok depolu araç rotalama problemine benzemekle birlikte yapısı farklıdır. Her bir aracın başladığı depoya geri döndüğü çok depolu araç rotalama

problemi için klasik üç indeksli matematiksel model Golden vd. (1977) tarafından önerilmiştir.

Bu tez kapsamında ise talep noktasından (sanal depo) ana depoya doğru hareketin olduğu ve rotanın ana depoda sona erdiği (başlangıç noktasına geri dönüşün olmadığı) tersine açık uçlu çok depolu ve heterojen kapasiteli araç rotalama problemi için dinamik araç rotalama matematiksel modeli geliştirilmiş ve MDROL – HFS VRP modeli adıyla anılmaktadır.

Tüm talep noktalarının taleplerinin dinamik olarak en kısa yol / en düşük maliyet ile karşılanması için optimum rotanın bulunmasını amaçlayan bu problemin çözümü için MDROL – HFS VRP modeli geliştirilmiştir. Dinamik araç rotalama esnasında her bir dinamik talep oluşması durumunda geliştirilen bu matematiksel model çalıştırılarak güncel rotalar oluşturulmaktadır. Önerilen matematiksel model aşağıda yer almaktadır;

Kümeler

N_c : Mevcut müşteri talep düğümleri alt kümesi $N_c = \{1, \dots, p\}$

N_d : Dinamik müşteri talep düğümleri alt kümesi $N_d = \{1, \dots, r\}$

N_s : Başlangıç depo alt kümesi $N_s = \{1, \dots, s\}$

N_e : Bitiş depo alt kümesi $N_e = \{1, \dots, e\}$

N_{cd} : Mevcut ve dinamik müşteri talep düğümleri alt kümesi $N_{cd} = \{1, \dots, p, p+1, \dots, p+r\}$

N_{cds} : Mevcut, dinamik müşteri talep düğümleri ve başlangıç depo alt kümesi $N_{cds} = \{1, \dots, p+r+s\}$

N : Düğümler kümesi $N = \{1, \dots, p, \dots, p+r, \dots, p+r+s, \dots, p+r+s+e\}$

V : Araç kümesi $V = \{1, \dots, k\}$

Parametreler

Q : Araç kapasitesi

T : Toplam dinamik ve mevcut müşteri talep düğüm sayısı ($p+r$)

c_{ij} = i düğümünden j düğüme gitme maliyeti

q_i = i . düğümün talep miktarı

$Vcap_k$ = k . aracın kapasitesi

$i = 1, i \in N$: Başlangıç Noktası

Karar Değişkeni

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & i \text{ düğümünden } j \text{ düğümüne } k \text{ aracı ile gidilirse} \\ 0, & \text{aksi takdirde} \end{cases}$$

u_i = Müşterilerin ziyaret edilme sıra karar değişkeni

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in V} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

s. t.

Kısıtlar

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N_{cd} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N_{cd} \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{i \in N_{cds} \\ i \neq l}} x_{ilk} - \sum_{j \in N} x_{ljk} = 0 \quad \forall k \in V, \forall l \in N_{cd} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N_{cd}} \sum_{j \in N} q_i * x_{ijk} \leq Vcap_k \quad \forall k \in V \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} \sum_{k \in V} x_{ijk} = 0 \quad \forall j \in N_s \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \sum_{k \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N_s \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N_s, \forall k \in V, k = i \quad (8)$$

$$u_i - u_j + T * x_{ijk} \leq T - 1 \quad \forall i, j \in N_c, i \neq j, \forall k \in V \quad (9)$$

$$x_{ijk} \geq 0 \quad x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad \forall k \in V \quad (10)$$

$$u_i \geq 0 \quad \text{Tamsayı} \quad \forall i \in N_{cd} \quad (11)$$

- (1) Toplam katedilen yol maliyetin minimizasyonu kısıtı
- (2) Her bir mevcut ve dinamik talep düğüm noktasına sadece 1 düğüm noktasından 1 araçla gelinmeli
- (3) Her bir mevcut ve dinamik talep düğüm noktasından sadece 1 düğüm noktasına 1 araçla gidilmeli
- (4) Herhangi bir mevcut veya dinamik talep düğüm noktasına bir giriş varsa çıkış da olmalı
- (5) Her bir araç kapasitesinin aşılması kısıtı
- (6) Dinamik (sanal) depolara geliş olmaması kısıtı
- (7) Dinamik (sanal) depolardan sadece 1 çıkışın (1 araç ile) olması
- (8) Dinamik (sanal) depolardan o depolarda bulunan araçlar ile çıkışın olması kısıtı
- (9) Miller, Tucker ve Zemlin alt tur eliminasyon kısıtı
- (10) (11) karar değişkeni domain kısıtı

3.3. SEZGİSEL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

3.3.1. Clarke & Wright Tasarruf Algoritması

1964 yılında, Clarke ve Wright genellikle klasik araç yönlendirme problemi olarak adlandırılan araç rotalama probleminin çözümü için bir algoritma geliştirmiştir (Clarke ve Wright, 1964). Bu algoritmada bir adet depo ve birden fazla talep noktası bulunmaktadır. Temeli tasarruf kavramına dayanan Clarke & Wright Tasarruf Algoritması sezgisel, buluşsal bir algoritmadır ve araç rotalama problemine optimal çözümü garanti etmemektedir.

3.3.1.1. Standart Clarke & Wright Tasarruf Algoritması

Algoritmanın başlangıcında N talep noktasının her birine ayrı bir aracın gidip geri döndüğü varsayılır ve rotalama probleminde N adet araç tarafından alınan toplam mesafe $\sum_{i \in N \setminus Depo} d(Depo, i)$ olarak hesaplanır. Bu algoritma ile son derece maliyetli bir başlangıç durumundan başlanarak tasarruf edilerek, yani (i, j) ikilisine iki ayrı araç yerine bir araç ile hizmet edilmesini elde edilecek kazancı baz alan bir yaklaşımla uygun çözüm elde edilmeye çalışılmaktadır.

CW Tasarruf Algoritması aşamalar;

Adım 1. Depo (D) hariç her bir talep noktası çifti (i, j) için $d(i, j)$ mesafe matrisi oluşturulur.

- Adım 2.** Depo hariç her bir talep noktası çifti için $s(i, j) = d(D, i) + d(D, j) - d(i, j)$ tasarruf değerleri hesaplanır.
- Adım 3.** $s(i, j)$ tasarruf değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır ve tasarruf listesi oluşturulur. Listenin ilk elemanından başlayarak Adım 4'e başlanır.
- Adım 4.** Değerlendirilmekte olan $s(i, j)$ için, (i, j) 'nin bir rotaya dahil edilmesi ile herhangi bir Araç Rotalama Problemi rota kısıtlaması (araç kapasite kısıtı vb.) ihlal edilmiyorsa aşağıdaki durumlar doğrultusunda (i, j) bir rotaya dahil edilir.
- Adım 4.1.** (i, j) ikilisinden her ikisi de henüz bir rotada yer almıyorsa $D - i - j - D$ rotası başlatılır.
- Adım 4.2.** (i, j) ikilisinden sadece bir tanesi var olan bir rotada yer alıyorsa ve bu nokta rotada depodan hemen sonra ya da hemen önce yer alıyorsa i, j linki bu rotaya eklenir.
- Adım 4.3.** (i, j) ikilisinden ikisi de önceden oluşturulmuş iki ayrı rotada yer alıyor, bu noktalar kendi buldukları rotalarda depodan hemen önce ya da hemen sonra yer alıyor ve iki rotada yer alan talep miktarları aracın toplam kapasitesini aşmıyorsa iki rota birleştirilerek tek bir rotaya genişler.
- Adım 5.** Aşağıdaki şartlardan herhangi birisi sağlanmıyorsa tasarruf listesindeki bir sonraki (i, j) ikilisi seçilir ve Adım 4'e dönülür.
- Adım 5.1.** Tüm şehirler bir rotaya atanmış ve rotaların birleştirilmesi araç kapasitelerinin aşılmasından dolayı mümkün değilse algoritma sonlanır.
- Adım 5.2.** Tasarruf listesinde (i, j) ikilisi kalmamışsa algoritma sonlanır.

3.3.1.2. Rassal Clarke & Wright Tasarruf Algoritması

CW tasarruf algoritması sezgisel bir yöntem olup optimal bir çözümü garanti etmemektedir. Bunun nedeni algoritmanın üçüncü adımında yer alan en yüksek tasarruf değerine sahip düğümün öncelikle rotaya alınmasıdır. Bu durum sonraki aşamalarda elde edilebilecek olası daha büyük iyileştirmeleri engelleyebilir ancak bunun daha önceden öngörülebilmesi mümkün değildir. Bu sorunu yönetmek amacıyla Standart CW tasarruf algoritma adımlarından (3.3.1.1) 3. adımda oluşturulan tasarruf listesinin en yüksek tasarrufa sahip elemanını almak yerine en yüksek tasarrufa sahip n düğümden (çalışma kapsamında 3 alınmıştır) rastgele bir tanesi seçilerek standart CW tasarruf algoritması adımları uygulanır. Böylelikle, daha ileride yüksek tasarruf elde etme potansiyeli taşıyan depoların daha erken çözümden çıkması önlenir. (VRP Solver, <https://coral.ise.lehigh.edu/larry/software/vrp-solver/>)

3.3.1.3. Rassal İteratif Clarke & Wright Tasarruf Algoritması

3.3.1.2’de anlatılan algoritma stokastik bir yapıda olup her çalıştırıldığında farklı sonuç verebilmektedir. Bu doğrultuda belirlenen bir iterasyon değerin 3.3.1.2’de yer alan algoritma çalıştırılarak, elde edilen sonuçlar kümesinden minimum değere sahip rota kümesi nihai rota olarak kabul edilir. Bu algoritma standart kapasite kısıtlı araç rotalama probleminin yani dinamik araç rotalama problemine başlangıç çözümünün elde edildiği birinci aşamada kullanılan algoritmadır.

3.3.2. Çok Depolu Tersine Açık Uçlu Heterojen Kapasiteli Clarke & Wright Tasarruf Algoritması (Multi Depot Reversed Open Loop CW Saving Algorithm with Heterogeneous Fleet Size – MDROL – HFS CW)

Dinamik araç rotalama problemi için standart CW tasarruf algoritması çözüm sağlayamamaktadır. Dinamik talep olduğu durumda birbirinden farklı konumlara ve kapasitelere sahip araçların dinamik rotalanması için standart CW algoritması revize edilerek yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma (MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması) ile güncel talep noktalarını da içeren yeni dinamik rota kümeleri belirlenir.

Dinamik bir talep oluşması durumunda aşağıdaki MDROL – HFS CW ön hazırlık adımları sırasıyla takip edilir;

- Adım 1.** Araçların mevcut konumları belirlenir.
- Adım 2.** Dinamik talep anına kadar gidilen ve gidilmesi gereken müşteriler belirlenir.
- Adım 3.** Araçların kapasite kullanım miktarları ve kalan kapasiteleri hesaplanır.
- Adım 4.** Dinamik taleplerin olduğu anda eğer araç(lar) turunu tamamlamış ise başlangıç deposunda tam kapasite ile hizmet vermeyi bekler.
- Adım 5.** Gidilmesi gereken talep noktaları listesine dinamik talepler de eklenir.
- Adım 6.** Araçların kalan kapasiteleri dikkate alınarak ek bir araç ihtiyacı olup olmadığı belirlenir ve ihtiyaç halinde araç sayısı güncellenir.
- Adım 7.** Dinamik talep olduğu anda araçların bulunduğu konumlar sanal depolar olarak adlandırılır ve dinamik taleplerin de yer aldığı mesafe matrisi yenilenir ve böylece MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritmasının başlangıcı için gerekli ön hazırlıklar tamamlanarak önerilen algoritma uygulanır.

MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması Sözde Kodu

Input V_{cap_k} // Dinamik talep olduğu andaki araçların kalan kapasiteleri, $\forall k$ **in** araçlar

Input loop assign_i // $\forall i$ **in** talep noktaları

// Tüm talep noktalarının atanmış olduğu rota / araç numarası, başlangıçta “0”

Input order in loop_i // $\forall i$ **in** talep noktaları

// Tüm talep noktalarının bulunduğu rotadaki sırası, başlangıçta “0”

Calculate $\lambda \leftarrow \min(C_{kj}) / \max(C_{ij}) \forall k$ **in** araçlar $\forall i, j$ **in** talep noktaları

// Her bir depo ve talep noktası arasındaki maliyetin / mesafenin minimum değerinin her

// bir talep noktası ikilisi arasındaki maliyetin / mesafenin maksimum değerine bölünmesi

Set surplus $\leftarrow 0$

Set control $\leftarrow 0$

If $\lambda < 0,5$ **then**

$\lambda \leftarrow 0,5$

surplus $\leftarrow 0,5 * \max(C_{ij}) - \min(C_{kj}) \forall k$ **in** araçlar $\forall i, j$ **in** talep noktaları

Calculate Tasarruf Listesi $\leftarrow C_{kj} - \lambda * C_{ij} + \text{surplus} \forall k$ **in** araçlar $\forall i, j$ **in** talep noktaları

Sort by Dsc Tasarruf Listesi (S_{kij})

Set $V_k \leftarrow S_k \subset S_{kij}$

// S_{kij} tasarruf matrisinin ilk indisi araç numara bilgisi olarak ifade edilmektedir

Set $S_{ij} \leftarrow S_{ij} \subset S_{kij}$

// S_{kij} matrisinin 2. ve 3. indisleri i ve j. talep noktaları kümesi tasarruf değerleri

Set $S_i \leftarrow S_i \subset S_{ij}$

// Tasarruf listesinin i. talep noktaları kümesi

Set $S_j \leftarrow S_j \subset S_{ij}$

// Tasarruf listesinin j. talep noktaları kümesi

For all $S_{kij} \forall k$ **in** araçlar $\forall i, j$ **in** talep noktaları **do**

If loop assign [S_i] = 0 **and** loop assign [S_j] = 0 **then**

If $Q[S_i] + Q[S_j] \leq V_{cap_k}$ **then**

loop assign [S_i] = V_k , loop assign [S_j] = V_k

rr = 0

For a in loop assign **do**

If order in loop[a] > rr **and** loop assign[a] = V_k **then**

rr = order in loop[a]

order in loop [S_i] = rr+1, order in loop [S_j] = rr+2

End If

End For

End If

Else If loop assign [S_i] $\neq 0$ **and** loop assign [S_j] $\neq 0$ **then**

If $V_i \neq V_j$ **then**

```

TotalQofi ← sum (Q where loop assign [Si] = Vi)
TotalQofj ← sum (Q where loop assign [Sj] = Vj)
If TotalQofi + TotalQofj ≤ Vcapi and loop assign [Si] = Vk then
    If (order in loop [Si] = min (order in loop) or order in loop
        [Si] = max (order in loop)) and (order in loop [Sj] = min
        (order in loop) or order in loop [Sj] = max (order in loop))
    then
        loop assign [Sj] ← loop assign [Si]
    End If
Else If TotalQofi + TotalQofj ≤ Vcapj and loop assign [Sj] = Vk
then
    If (order in loop [Si] = min (order in loop) or order in loop
        [Si] = max (order in loop)) and (order in loop [Sj] = min
        (order in loop) or order in loop [Sj] = max (order in loop))
    then
        loop assign [Si] ← loop assign [Sj]
    End If
End If
Else If
Else
If loop assign [Si] ≠ 0 and loop assign [Sj] = 0 and Vi = loop assign [Si]
then
    TotalQ ← sum (Q where loop assign [Si] = Vi)
    If TotalQ + Q [Sj] ≤ Vcapi then
        If (order in loop [Si] = min (order in loop) or order in loop
            [Si] = max (order in loop)) then
            loop assign [Sj] ← loop assign [Si]
        End If
    End If
Else If loop assign [Si] = 0 and loop assign [Sj] ≠ 0 and Vj = loop assign
    [j] then
        TotalQ ← sum (Q where loop assign [Sj] = Vj)
        If TotalQ + Q [Si] ≤ Vcapj then
            If (order in loop [Sj] = min (order in loop) or order in loop
                [Sj] = max (order in loop)) then
                loop assign [Si] ← loop assign [Sj]
            End If
        End If
    End If
End If
End If
Call Revised Saving List
End For

```

MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması Sözde Kodu Açıklamaları

Adım 1. $S_{kij} = C_{kj} - \lambda * C_{ij} + \text{surplus } k$: depo, i, j talep noktaları formülü ile her bir araç (depo) ile talep noktaları arasındaki tasarruf değerleri hesaplanır.

// S_{kij} tasarruf matrisinin ilk indisi araç numara bilgisi olarak ifade edilmektedir ve $V_k (S_k)$ olarak belirtilmiştir.

// S_{kij} matrisinin 2. ve 3. indisleri i ve j . talep noktaları kümesi tasarruf değerleri S_{ij} olarak belirtilmiştir.

Adım 1.1. Negatif bir tasarruf değeri olamayacağı için C_{kj} değerinin minimum değeri ile C_{ij} değerinin maksimum değeri hesaplanır.

λ değeri ise $\min(C_{kj}) / \max(C_{ij})$ olarak hesaplanır. Surplus 0 kabul edilir. Depo ve düğümler arası ağırlığa eşit önem vermek için λ değeri 0,5'den küçük ise λ 0,5 olarak kabul edilir ve $\text{surplus} = 0,5 * \max(C_{ij}) - \min(C_{kj})$ olarak hesaplanır.

Adım 2. Tasarruf değerleri büyükten küçüğe sıralanır.

Adım 3. S_{kij} tasarruf matrisi $V_k (S_k)$ ve S_{ij} olarak iki ayrı matrise ayrılır. S_{ij} tasarruf değerleri i noktasından j noktasına hangi araçla (depodan) yani V_k değeri ile gidilmesi durumunda elde edilecek tasarruf verisidir.

Adım 4. En büyük S_{kij} değerinde başlanarak sırasıyla tüm S_{kij} için aşağıdaki algoritma çalıştırılır.

Adım 4.1. S_{kij} için i ve j talep noktalarının ikisi de herhangi bir rotaya atanmamış ise

Adım 4.1.1. i ve j talep noktalarının kapasite (Q) değerlerinin toplamı k . aracın kalan kapasite değerinden küçük veya eşit ise i ve j noktaları sırasıyla k . araca atanır.

Adım 4.2. i ve j talep noktalarından ikisi de farklı bir rotaya/araca atanmış ise

Adım 4.2.1. İki rotada yer alan talep noktalarının talep miktarları i . talep noktasının bulunduğu araç kapasitesini aşmıyor ve V_k değeri i . talep noktasının bulunduğu aracı ifade ediyorsa

Adım 4.2.1.1. i ve j talep noktalarının her ikisi de buldukları döngünün birinci veya sonuncu noktası yani depoya ardışık ise j . araçta bulunan talep noktaları i . aracın döngüsüne eklenir.

Adım 4.2.2. İki rotada yer alan talep noktalarının talep miktarları j . talep noktasının bulunduğu araç kapasitesini aşmıyor ve V_k değeri j . talep noktasının bulunduğu aracı ifade ediyorsa

Adım 4.2.2.1. i ve j talep noktalarının her ikisi de buldukları döngünün birinci veya sonuncu noktası yani depoya ardışık ise i . araçta bulunan talep noktaları j . aracın döngüsüne eklenir.

Adım 4.3. i ve j talep noktalarından sadece biri rotaya/araca atanmış ise

Adım 4.3.1. V_k değeri rotaya/araca atanmış talep noktasının araç değerini ifade ediyor, herhangi bir rotaya atanmamış talep noktasının talep miktarı k . aracın kapasitesini aşmıyor ve rotaya atanmış olan talep noktası bulunduğu rotanın birinci veya sonuncu noktası ise rotaya atanmamış talep noktası k . aracın rotasına dahil edilir.

Adım 4.4. Revised Saving List Algoritması çağrılır ve çalıştırılır

Adım 5. Aşağıdaki şartlardan herhangi birisi sağlanmıyorsa tasarruf listesindeki bir sonraki S_{kij} seçilir ve Adım 4.' e dönülür.

Adım 5.1. Tüm talep noktaları bir rotaya / araca atanmış ve rotaların birleştirilmesi araç kapasitelerinin aşılmasından dolayı mümkün değilse algoritma sonlanır.

Adım 5.2. Tasarruf listesinde S_{kij} kalmamışsa algoritma sonlanır.

Önerilen Rassal İteratif MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritmasını daha da iyileştirmek için talep noktası ve araç sayısı ile orantılı olarak artan tasarruf listesinde katma değeri olmayan tasarruf verilerinin listeden çıkartılması ve çözüm süresinin kısaltılması amacıyla Revised Saving List Algoritması geliştirilmiştir. Revised Saving List algoritması bu tez kapsamında oluşturulan ve sözde kodu aşağıda paylaşılan bir diğer katkıdır.

Algoritma. Revised Saving List

Begin

Length \leftarrow 1

For all m in loop assign $\forall i$ in talep noktaları **do**

If loop assign $[m] \neq 0$ // m . Talep noktası herhangi bir rotaya atanmışsa

Length \leftarrow Length + 1

End If

End For

If Length \geq size(loop assign) * 0,5 **and** kontrol = 0 **then** // %50'den fazla talep noktası herhangi bir rotaya atanmışsa

kontrol \leftarrow 1

Set First Last \leftarrow First Last \subset loop assign_i $\forall i$ **in** talep noktaları // Kendi lopunun birinci veya sonuncu sırasında yer alan talep noktası kümesi

Set Unassigned \leftarrow Unassigned \subset loop assign_i $\forall i$ **in** talep noktaları // Herhangi bir rotaya atanmamış talep noktaları kümesi

Set Partial_S_{kij} \leftarrow Partial_S_{kij} \subset S_{kij} // %50'den fazla talep noktası atanması ve kontrol değerinin 0'a eşit olması koşulu sağlanması durumunda kalan S_{kij} listesi

Set Partial_V_k \leftarrow Partial_S_k \subset Partial_S_{kij}

// Partial_S_{kij} tasarruf matrisinin ilk indisi araç numara bilgisi olarak ifade edilmektedir

Set Partial_S_{ij} \leftarrow Partial_S_{ij} \subset Partial_S_{kij}

// Partial_S_{kij} matrisinin 2. ve 3. indisleri i ve j. talep noktaları kümesi tasarruf değerleri

Set Partial_S_i \leftarrow Partial_S_i \subset Partial_S_{ij}

// Tasarruf listesinin i. talep noktaları kümesi

Set Partial_S_j \leftarrow Partial_S_j \subset Partial_S_{ij}

// Tasarruf listesinin j. talep noktaları kümesi

Set Revised_V_k \leftarrow 0 // Araç numara bilgisi boş matris

Set Revised_S_{ij} \leftarrow 0 // i ve j talep noktalarını içeren boş tasarruf listesi

For n = 1 to n \in Partial_S_{kij} $\forall k$ **in** araçlar $\forall i, j$ **in** talep noktaları **do**

If Partial_S_i [n] **in** Unassigned **and** Partial_S_j [n] **in** Unassigned **then**

// Birinci ve ikinci talep noktalarının her ikisi de herhangi bir rotaya atanmamış ise ilgili tasarruf Partial_S_{kij} listesine eklenir

Revised_S_{ij} \leftarrow Partial_S_{ij} [n]

Revised_V_k \leftarrow Partial_V_k [n]

Else If Partial_S_i [n] **in** First Last **and** Partial_S_j [n] **in** First Last **and** (Partial_V_k [n] = loop assign [Partial_S_i [n]] **or** Partial_V_k [n] = loop assign [Partial_S_j [n]]) **then**

// Her iki talep noktası da bir rotaya atanmış ve buldukları rotanın ya ilk ya da son sırasında bulunması durumu

Revised_S_{ij} \leftarrow Partial_S_{ij} [n]

Revised_V_k \leftarrow Partial_V_k [n]

Else If Partial_S_i [n] **in** First Last **and** Partial_S_j [n] **in** Unassigned **and** Partial_V_k [n] = loop assign [Partial_S_i [n]] **then**

// Birinci talep noktası bir rotaya atanmış, bulunduğu rotanın ilk / son sırasında bulunmakta ve ikinci talep noktası herhangi bir rotaya atanmamış

ve ilgili tasarruf verisinin araç numara değeri atanmış olan birinci talep noktasının araç numarasına eşit olma durumu

Revised_ $S_{ij} \leftarrow$ Partial_ $S_{ij} [n]$

Revised_ $V_k \leftarrow$ Partial_ $V_k [n]$

Else If Partial_ $S_j [n]$ **in** First Last **and** Partial_ $S_i [n]$ **in** Unassigned **and** Partial_ $V_k [n] =$ loop assign [Partial_ $S_j [n]$] **then**

// İkinci talep noktası bir rotaya atanmış, bulunduğu rotanın ilk / son sırasında bulunmakta ve birinci talep noktası herhangi bir rotaya atanmamış ve ilgili tasarruf verisinin araç numara değeri atanmış olan ikinci talep noktasının araç numarasına eşit olma durumu

Revised_ $S_{ij} \leftarrow$ Partial_ $S_{ij} [n]$

Revised_ $V_k \leftarrow$ Partial_ $V_k [n]$

End If

End For

Set $V_k \leftarrow$ Revised_ V_k

Set $S_{ij} \leftarrow$ Revised_ S_{ij}

Set $S_i \leftarrow$ Revised_ $S_i \subset$ Revised_ S_{ij}

Set $S_j \leftarrow$ Revised_ $S_j \subset$ Revised_ S_{ij}

End

Revised Saving List Algoritması Sözde Kodu Açıklamaları

Adım 1. Herhangi bir rotaya atanmış talep noktası sayısı (Length) hesaplanır.

Adım 2. Herhangi bir rotaya atanan talep noktası sayısı toplam talep noktasının sayısının %50'sinden büyük ve eşit ise ve bu döngüye bir kez girmesini sağlayan kontrol değeri 0 ise (daha önce Revised Saving List algoritması çalıştırılmamış) kontrol değeri 1 olarak ayarlanır.

Adım 2.1. Herhangi bir rotaya atanmış ve kendi döngüsünün birinci veya sonuncu sırasında yer alan talep noktaları kümesi (First Last) oluşturulur.

Adım 2.2. Herhangi bir rotaya atanmamış talep noktaları kümesi (Unassigned) oluşturulur.

Adım 2.3. %50'den fazla talep noktasının atanması ve kontrol değerinin 0'a eşit olması koşulunun sağlandığı anda S_{kij} listesinden geriye kalan ve işlem yapılmayı bekleyen liste (Partial_ S_{kij}) oluşturulur.

Adım 2.4. Partial_ S_{kij} tasarruf matrisinin ilk indisi olan araç numara bilgisi Partial_ V_k olarak oluşturulur.

Adım 2.5. Partial_ S_{kij} matrisinin 2. ve 3. indisleri i ve j . talep noktaları kümesi tasarruf değerleri Partial_ S_{ij} olarak elde edilir.

Adım 2.6. Tasarruf listesinin, i . talep noktaları kümesi Partial_ S_i ve j . talep noktaları kümesi Partial_ S_j olarak elde edilir.

Adım 2.7. Partial_ S_{kij} listesinin her bir elemanı için aşağıdaki koşullardan herhangi birinin sağlanması durumunda elde edilen ilgili talep noktaları tasarruf bilgileri (Partial_ S_{ij} [n]) Revised_ S_{ij} , ilgili tasarruf listesi değeri için araç numara bilgisi (Partial_ V_k [n]) ise Revised_ V_k matrisine eklenir.

Adım 2.7.1. Birinci ve ikinci talep noktalarının her ikisi de herhangi bir rotaya atanmamış (Partial_ S_i [n] **and** Partial_ S_j [n] **in** Unassigned) ise ilgili tasarruf Revised_ S_{ij} matrisine, araç numara bilgisi ise Revised_ V_k matrisine eklenir.

Adım 2.7.2. Her iki talep noktası da bir rotaya atanmış (Partial_ S_i [n] **and** Partial_ S_j [n] **in** First Last) ve buldukları rotanın ya ilk ya da son sırasında bulunması (Partial_ V_k [n] = loop assign [Partial_ S_i [n]] **or** Partial_ V_k [n] = loop assign [Partial_ S_j [n]]) durumunda ilgili tasarruf Revised_ S_{ij} matrisine, araç numara bilgisi ise Revised_ V_k matrisine eklenir.

Adım 2.7.3. Birinci talep noktası bir rotaya atanmış, bulunduğu rotanın ilk / son sırasında bulunmakta (Partial_ S_i [n] **in** First Last) ve ikinci talep noktası herhangi bir rotaya atanmamış ve ilgili tasarruf verisinin araç numara değeri atanmış olan birinci talep noktasının araç numarasına eşit (Partial_ S_j [n] **in** Unassigned **and** Partial_ V_k [n] = loop assign [Partial_ S_i [n]]) olma durumunda ilgili tasarruf Revised_ S_{ij} matrisine, araç numara bilgisi ise Revised_ V_k matrisine eklenir.

Adım 2.7.4. İkinci talep noktası bir rotaya atanmış, bulunduğu rotanın ilk / son sırasında bulunmakta ($Partial_S_j [n]$ in First Last) ve birinci talep noktası herhangi bir rotaya atanmamış ($Partial_S_i [n]$ in Unassigned) ve ilgili tasarruf verisinin araç numara değeri atanmış olan ikinci talep noktasının araç numarasına eşit (**and** $Partial_V_k [n] = loop\ assign [Partial_S_j [n]]$) olması durumunda ilgili tasarruf $Revised_S_{ij}$ matrisine, araç numara bilgisi ise $Revised_V_k$ matrisine eklenir.

Adım 2.8. Bir önceki aşamada yapılan işlemler sonucunda algoritmaya değer katmayan ve gereksiz süre kaybına neden olan tasarruf verileri listeden çıkartılır ve tasarruf listesi güncellenerek çözümün elde edilme süre oldukça hızlandırılmaktadır.

Adım 2.9. $Revised_V_k$, $Revised_S_{ij}$, $Revised_S_i$ ve $Revised_S_j$ matrisleri orijinal V_k , S_{ij} , S_i ve S_j matrislerine atanır.

Adım 3. Revised Saving List Algoritması sonlandırılır ve MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması kaldığı yerden çalışmaya devam eder.

Problem boyutu dikkate alınarak Revised Saving List algoritmasının 2 farklı aşama olarak da çalıştırılması değerlendirilebilir. Örneğin; talep noktası atama oranının %50 büyük ve %85 den büyük olması durumunda iki aşamalı Revised Saving List algoritması kullanılabilir. Aşama sayısının fazla olması veya talep noktası atama oranının çok fazla küçük / büyük olması durumunda etkin sonuçlar elde edilemeyeceği görülmektedir.

3.3.2.1. Rassal MDROL – HFS Clarke & Wright Tasarruf Algoritması

CW tasarruf algoritması sezgisel bir yöntem olup optimal bir çözümü garanti etmemektedir. Bunun nedeni, standart CW tasarruf algoritmasında olduğu gibi MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması'nda da tasarruf listesinde yer alan en yüksek tasarruf değerine sahip düğümün öncelikle rotaya alınmasıdır. Bu durum, sonraki aşamalarda elde edilebilecek olası daha büyük iyileştirmeleri engelleyebilmektedir. Bu durumu yönetmek amacıyla MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması'nın ön hazırlık adımlarının tamamlanması ve tasarruf listesinin oluşturulmasından sonra MDROL – HFS CW

Tasarruf Algoritması sözde kodu açıklamasında Adım 2' de oluşturulan tasarruf listesinde en yüksek tasarrufa sahip elemanı almak yerine en yüksek tasarrufa sahip n düğümden (çalışma kapsamında 5 alınmıştır) rastgele bir tanesi seçilerek MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması adımları uygulanır. Böylelikle, ileride yüksek tasarruf elde etme potansiyeli taşıyan depoların daha erken çözümden çıkması önlenebilir.

3.3.2.2. Rassal İteratif MDROL – HFS Clarke & Wright Tasarruf Algoritması

3.3.2.1'de anlatılan algoritma stokastik bir yapıda olup her çalıştırıldığında farklı sonuç verebilmektedir. Bu doğrultuda belirlenen bir iterasyon değerincede 3.3.2.1'de yer alan algoritma çalıştırılarak, elde edilen sonuçlar kümesinden minimum değere sahip rota kümesi nihai rota olarak kabul edilir. Bu algoritma, tez kapsamında ikinci aşama olarak adlandırılan dinamik araç rotalama probleminin çözümünde kullanılacak algoritmadır.

4. BÖLÜM

DİNAMİK ARAÇ ROTALAMA UYGULAMASI

Dinamik araç rotalama problemi için 2 aşamadan oluşan matematiksel model geliştirilmiştir. Büyük problem boyutlarında da hızlı ve yüksek doğruluk oranında sonuç elde edilebilmesi için sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Problem boyutunun artması matematiksel modelin çözüm bulma süresini üstel olarak artıracak ve optimal çözümün bulunma süresi saatler, günler ve daha fazla zaman ihtiyacı gerektirecektir. Bu durum araçların dinamik olarak rotalanması zorlaştıracak ve hızlı aksiyon alma imkanını ortadan kaldıracaktır. Hem dinamik araç rotalamanın doğası gereği hem de günümüz şartlarının hız ve yüksek doğruluk oranında çözüm ihtiyacı gerektirmesinden dolayı bu tez kapsamında dinamik araç rotalamaya imkan tanıyan hızlı ve yüksek doğruluk oranını garanti eden sezgisel bir algoritma da geliştirilmiştir.

Dinamik araç rotalama problemlerinin çözümü için 2 aşamadan oluşan matematiksel model ve matematiksel modele karşılık geliştirilen sezgisel algoritma bulunmaktadır. Birinci aşamada, statik talepler dikkate alınarak başlangıç rotalarının yer aldığı çözüm kümesi elde edilmekte; ikinci aşamada ise dinamik araç rotalama yapılmaktadır. Kesin çözüm yöntemi ve sezgisel algoritma karşılıkları Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Dinamik Araç Rotalama Kesin Çözüm Yöntemi ve Önerilen Sezgisel Algoritma Aşamaları

Dinamik Araç Rotalama		
	<i>Kesin Çözüm Yöntemi</i>	<i>Önerilen Sezgisel Algoritma</i>
Başlangıç Çözümü (Birinci Aşama)	Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama (CVRP)	Rassal İteratif Clarke & Wright (CW) Tasarruf Algoritması
Dinamik Rotalama (İkinci Aşama)	Çok Depolu Tersine Açık Uçlu Heterojen Kapasiteli (MDROL – HFS) Araç Rotalama (Bu çalışma kapsamında geliştirilmiştir)	Rassal İteratif MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması (Bu çalışma kapsamında geliştirilmiştir)

4.1. VERİ SETLERİ

Araç rotalama için kullanılan farklı boyutlardaki örneklem büyüklüklerinden oluşan veri setleri ve veri setlerinin özellikleri Tablo 2’de yer almaktadır.

Tablo 2. Dinamik Araç Rotalama için Kullanılacak CVRP Veri Setleri ve Bilgiler

#	Benchmark	Veri Seti	Müşteri Sayısı	Araç Sayısı	Araç Kapasitesi	Optimal Değer
1	Set P (Augerat, 1995)	P – n19 – k2	18	2	160	212
2	Set P (Augerat, 1995)	P – n20 – k2	19	2	160	216
3	Set E (Christofides and Elion, 1969)	E – n23 – k3	22	3	4.500	569
4	Set P (Augerat, 1995)	P – n23 – k8	22	8	40	529
5	Set B (Augerat, 1995)	B – n31 – k5	30	5	100	672
6	Set E (Christofides and Elion, 1969)	E – n33 – k4	32	4	8.000	835
7	Set A (Augerat, 1995)	A – n37 – k6	36	6	100	949
8	Set B (Augerat, 1995)	B – n39 – k5	38	5	100	549
9	Set F (Fisher, 1994)	F – n45 – k4	44	4	2.010	724
10	Set A (Augerat, 1995)	A – n55 – k9	54	9	100	1.073
11	Set A (Augerat, 1995)	A – n63 – k10	62	10	100	1.314
12	Rochat and Taillard (1995)	tai75a	75	10	1.445	1.618,4
13	Set P (Augerat, 1995)	P – n76 – k4	75	4	350	593
14	Set E (Christofides and Elion, 1969)	E – 101 – k14	100	14	112	1.067
15	Set M (Christofides, Mingozi and Toth, 1979)	M – n151 – k12	150	12	200	1015

16	Christofides, Mingozi and Toth (1979)	CMT10	199	18	200	1.395,9
17	Set M (Christofides, Mingozi and Toth, 1979)	M – n200 – k17	199	17	200	1.275
18	Uchoa vd. (2014)	X – n251 – k28	250	28	69	38.684
19	Uchoa vd. (2014)	X – n322 – k28	321	28	868	29.834

Veri setlerine <http://vrp.atd-lab.inf.puc-rio.br/index.php/en/> adresinden erişilebilir.

4.2. KESİN ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Dinamik araç rotalama problemi için oluşturulan, başlangıç talep noktaları ve bu noktalara ait bilgileri içeren test veri setine ait detaylar aşağıdaki gibidir;

Tablo 3. Veri Seti – I Talep Noktaları Koordinat ve Talep Miktarı Bilgisi

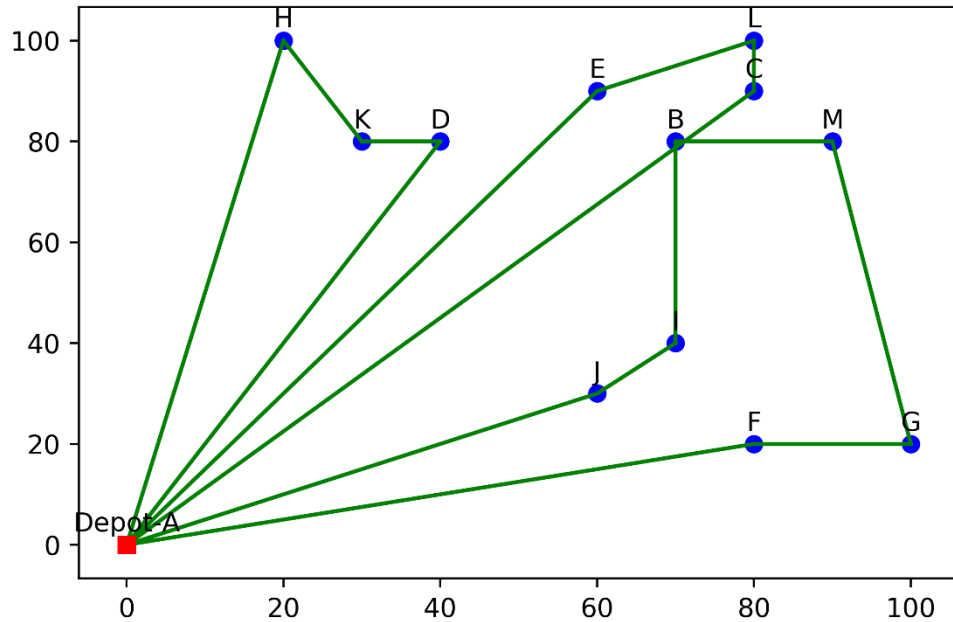
Talep Noktası	X	Y	Talep Miktarı (Q)
A (Depo)	0	0	0
B	70	80	7
C	80	90	14
D	40	80	4
E	60	90	8
F	80	20	3
G	100	20	5
H	20	100	12
I	70	40	13
J	60	30	3
K	30	80	21
L	80	100	25
M	90	80	18

12 talep noktası ve 1 depodan oluşan veri seti için 50 birim kapasiteye sahip özdeş araçlar kullanılarak rotalama yapılması planlanmaktadır. Başlangıç durumu için matematiksel model kullanılarak elde edilen başlangıç rotaları aşağıda yer alan Tablo 4. Veri Seti – I Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri adlı tabloda gösterilmektedir.

Tablo 4. Veri Seti – I Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri

# Rota	Seyahat Güzergahı	Rota Uzunluğu	Rota Yük Miktarı
1	A – D – K – H – A	223,78	37
2	A – E – L – C – A	260,94	47
3	A – J – I – B – M – G – F – A	304,51	49
Optimum: 789,2 Süre: 1.39 sn		789.2	133

Tablo 4’de yer alan seyahat güzergahları; yeşil yaylar rotalar arası bağlantıları, mavi noktalar talep noktalarını ve kırmızı nokta ise ana depoyu belirtmek üzere Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. Veri Seti – I Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Sonucu

Problemi dinamik hale getirmek için çeşitli senaryolar geliştirilebilir. Bu bölümde problemin dinamik hale getirildiği 3 senaryo incelenmiştir. Bu senaryo detayları aşağıdaki gibidir;

Senaryo I: Araçların dinamik talepleri karşılayabilecek kapasitelerinin olması

Senaryo II: Araçların dinamik talepleri karşılayabilecek kapasitelerinin olmaması ve ana depodan yeni bir araç yönlendirilmesi

Senaryo III: Literatürde yer alan hazır veri seti uygulaması, araçların dinamik talepleri karşılayabilecek kapasitelerinin olmaması ve mevcut müşteri talep miktarı değişimi

4.2.1. Dinamik Araç Rotalama – Senaryo – I

Başlangıç rota planlaması yapıldıktan sonra araçlar rotaları üzerinde ilerlerken 110. saniyede 3 adet dinamik talep meydana geldiği durumda Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (CVRP) MDROL – HFS VRP problemine dönüşmektedir. Bu durumda dinamik talepler de dikkate alınarak rotalama yapılır ve araçların güncel rotaları elde edilir. Dinamik talepler ve taleplere ilişkin detaylar Tablo 5’de yer almaktadır.

Tablo 5. Veri Seti – I Dinamik Talep Noktaları Koordinat ve Talep Miktarı Bilgisi – Senaryo – I

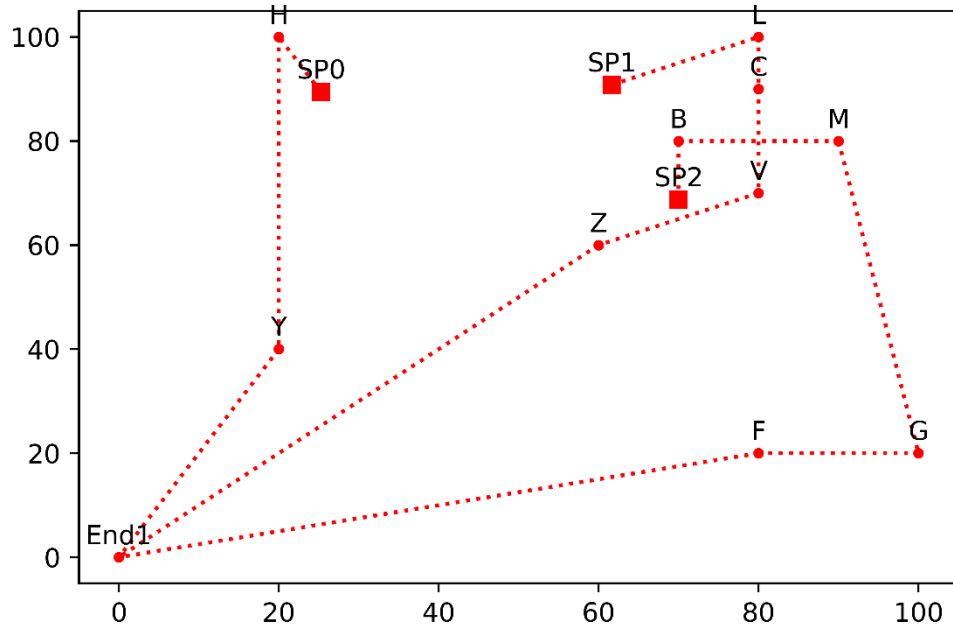
Talep Noktası	X	Y	Talep Miktarı (Q)
V	80	70	2
Y	20	40	2
Z	60	60	1

Dinamik talepler geldiği anda araçların bulunduğu konumlar ve kalan kapasiteleri Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6. Dinamik Talep Anında Araçların Kapasiteleri ve Koordinat Bilgileri – Senaryo – I

Sanal Depolar	X	Y	Kalan Kapasite
SP ₀	25,28	89,44	25
SP ₁	61,64	90,82	42
SP ₂	70	68,78	34

Dinamik talep oluşma anında, hizmet edilmeyi bekleyen statik talep noktaları ve dinamik talep noktalarının dikkate alınarak MDROL – HFS VRP matematiksel modelinin çalıştırılması sonucunda elde edilen güncel güzergah planı Şekil 7’de gösterilmiştir. “SP” ile ifade edilen noktalar dinamik talep anında araçların güncel konumunu, “End1” ise ana depoyu ifade etmektedir.



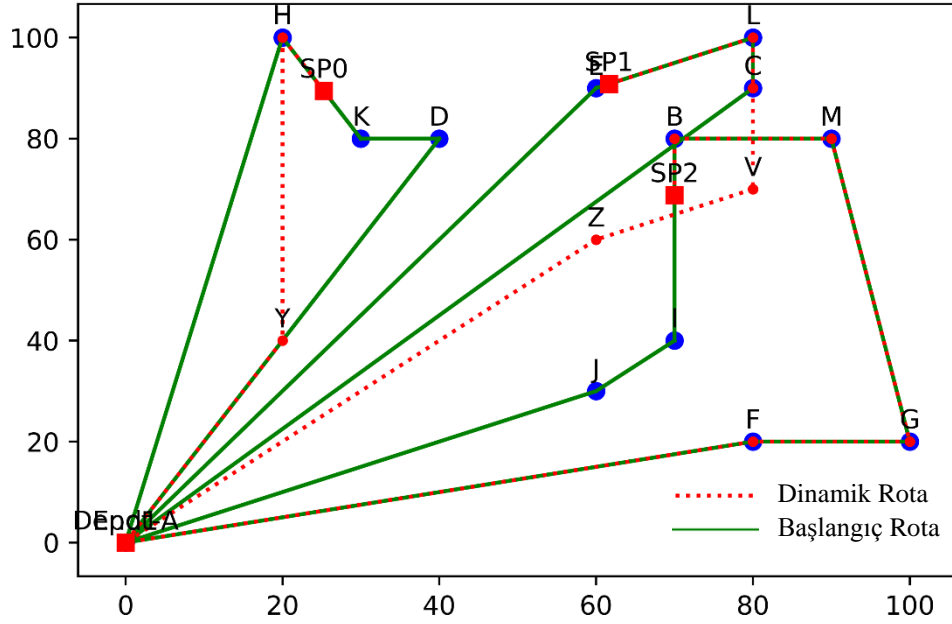
Şekil 7. Dinamik Talep Sonrası Veri Seti – I Dinamik Araç Rotalama (MDROL – HFS) Sonucu

Dinamik rotalama sonrası araçların güncel seyahat güzergahları, rota uzunlukları ve araçların dinamik talep sonrası yük miktarları Tablo 7. Veri Seti – I MDROL – HFS VRP Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – I ' de detaylandırılmıştır.

Tablo 7. Veri Seti – I MDROL – HFS VRP Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – I

# Rota	Seyahat Güzergahı	Rota Uzunluğu	Rota Yük Miktarı
1	SP ₀ – H – Y – A(End ₁)	116,52	14
2	SP ₁ – L – C – V – Z – A	157,74	42
3	SP ₂ – B – M – G – F – A	194,51	33
Optimum: 468,8 Süre: 0,30 sn		468,8	89

Başlangıç rotaları ve dinamik talepler sonrası elde edilen güncel rotalar aşağıdaki Şekil 8'de yer alan görselde görülmektedir.



Şekil 8. Veri Seti – I Dinamik Araç Rotalama – Senaryo – I – Başlangıç ve Dinamik Rota

Araçların başlangıç ve dinamik rotaları, rotaların uzunlukları, toplam rota uzunluğu, problemin çözüm süresi ve rotaların yük miktarları ise Tablo 8’de detaylandırılmıştır. Dinamik talepler **koyu siyah**, dinamik talep olduğu anda araçların bulunduğu noktalar (sanal depolar) **koyu kırmızı** olarak belirtilmektedir.

Tablo 8. Veri Seti – I Dinamik Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – I

#	Rota	Seyahat Güzergahı	Rota Uzunluğu	Rota Yük Miktarı
1	Başlangıç	A – D – K – H – A	223,78	37
	Dinamik	A – D – K – SP₀ – H – Y – A(End ₁)	226,52	39
2	Başlangıç	A – E – L – C – A	260,94	47
	Dinamik	A – E – SP₁ – L – C – V – Z – A	267,74	50
3	Başlangıç	A – J – I – B – M – G – F – A	304,51	49
	Dinamik	A – J – I – SP₂ – B – M – G – F – A	304,51	49
Dinamik Optimum: 798,8 Süre: 1,7 sn			798,8	138

4.2.2. Dinamik Araç Rotalama – Senaryo – II

Dinamik talepler mevcut durumda rota üzerinde yer alan araçlar tarafından karşılanabildiği için ilave araç ihtiyacı bulunmamıştır ancak; dinamik taleplerin aşağıdaki gibi olması durumunda taleplerin (dinamik talep + dinamik talep anında hizmet edilmeyi bekleyen statik talepler) mevcut araçlar tarafından karşılanması mümkün olmayacağı için ana depodan yeni bir araç yönlendirmesi gerekmektedir. Dinamik talep bilgilerinin Tablo 9’da belirtildiği gibi olması durumunda tüm talep noktalarının taleplerinin karşılanabilmesi için rotada bulunan mevcut araçlar haricinde ilave araç ihtiyacı oluşmakta olup depodan yeni bir araç yönlendirmesi gerçekleştirilir.

Tablo 9. Veri Seti – I Dinamik Talep Noktaları Koordinat ve Talep Miktarı Bilgisi– Senaryo – II

Talep Noktası	X	Y	Talep Miktarı (Q)
V	80	70	9
Y	20	40	25
Z	60	60	26

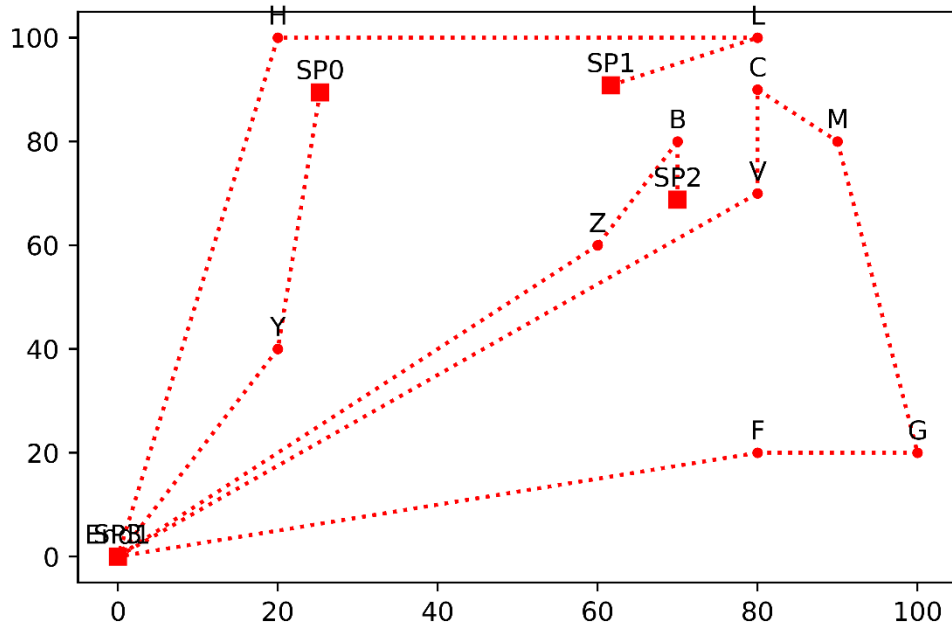
Yeni bir araç yönlendirmesi yapmadan önce talepler toplamı 144 birim, araçların kalan kapasite toplamları ise 101 birimdir. Bu durumda mevcut araçlar ile taleplerin karşılanması mümkün olamayacağından dinamik model tarafından otomatik olarak yeni bir araç yönlendirmesi yapılır ve rota planlaması oluşturulur.

Dinamik talep oluşma anında araçların bulunduğu konumlar ve kalan kapasiteleri aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 10. Dinamik Talep Anında Araçların Kapasiteleri ve Koordinat Bilgileri – Senaryo – II

Sanal Depolar	X	Y	Kalan Kapasite
SP ₀	25,28	89,44	25
SP ₁	61,64	90,82	42
SP ₂	70	68,78	34
SP ₃	0	0	50

110. saniyede meydana gelen dinamik talepler sonrası MDROL – HFS VRP matematiksel modelinin çalıştırılması sonucunda elde edilen güncel güzergah planı aşağıdaki Şekil 9’da gösterilmiştir.



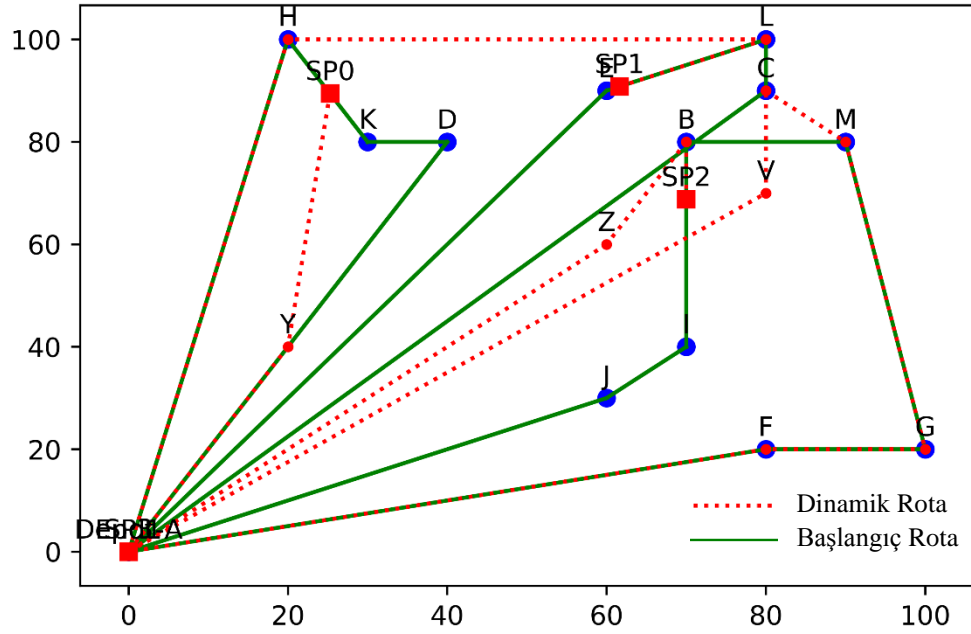
Şekil 9. Dinamik Talep – Senaryo – II Sonrası Veri Seti – I MDROL – HFS Sonucu

Dinamik rotalama sonrası araçların güncel seyahat güzergahları, rota uzunlukları ve araçların dinamik talep sonrası yük miktarları ile çözüm süresini içeren bilgiler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 11. Veri Seti – I MDROL – HFS Dinamik Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – II

# Rota	Seyahat Güzergahı	Rota Uzunluğu	Rota Yük Miktarı
1	SP ₀ – Y – A(End ₁)	94,45	25
2	SP ₁ – L – H – A	182,51	37
3	SP ₂ – B – Z – A	118,44	33
4	A(SP ₃) – V – C – M – G – F – A	303,73	49
Optimum: 699,1 Süre: 7,6 sn		699,1	144

Başlangıç rotaları ve dinamik talepler sonrası elde edilen güncel rotalar aşağıda yer alan Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Veri Seti – I Dinamik Araç Rotalama – II Başlangıç ve Dinamik Rota

Araçların başlangıç ve dinamik rotaları ve rotaya dair detaylı bilgiler ise Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. Veri Seti – I Dinamik Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – II

#	Rota	Seyahat Güzergahı	Rota Uzunluğu	Rota Yük Miktarı
1	Başlangıç	A – D – K – H – A	223,78	37
	Dinamik	A – D – K – SP₀ – Y – A(End ₁)	204,45	50
2	Başlangıç	A – E – L – C – A	260,94	47
	Dinamik	A – E – SP₁ – L – H – A	292,51	45
3	Başlangıç	A – J – I – B – M – G – F – A	304,51	49
	Dinamik	A – J – I – SP₂ – B – Z – A	228,44	49
4	Başlangıç	-	-	-
	Dinamik	A(SP₃) – V – C – M – G – F – A	303,73	49
Dinamik Optimum: 1.029,1 Süre: 8,9 sn			1.029,1	193

Genel olarak değerlendirildiğinde;

- V dinamik talebi 4., Y dinamik talebi 1. ve Z dinamik talebi ise 3. rotaya eklemiştir.
- Başlangıçta 1. Rotada yer alan “H” talep noktası dinamik durumda 2. Rotada yer almaktadır.
- Başlangıç çözümüne göre 2. Rotada yer alan “C” talep noktası dinamik rotalama sonrasında 4. Rotada yer almıştır.
- Başlangıç çözümüne göre 3. Rotada yer alan “G, F ve M” talep noktaları ise dinamik rotalama sonrasında 4. Rotada yer almıştır.

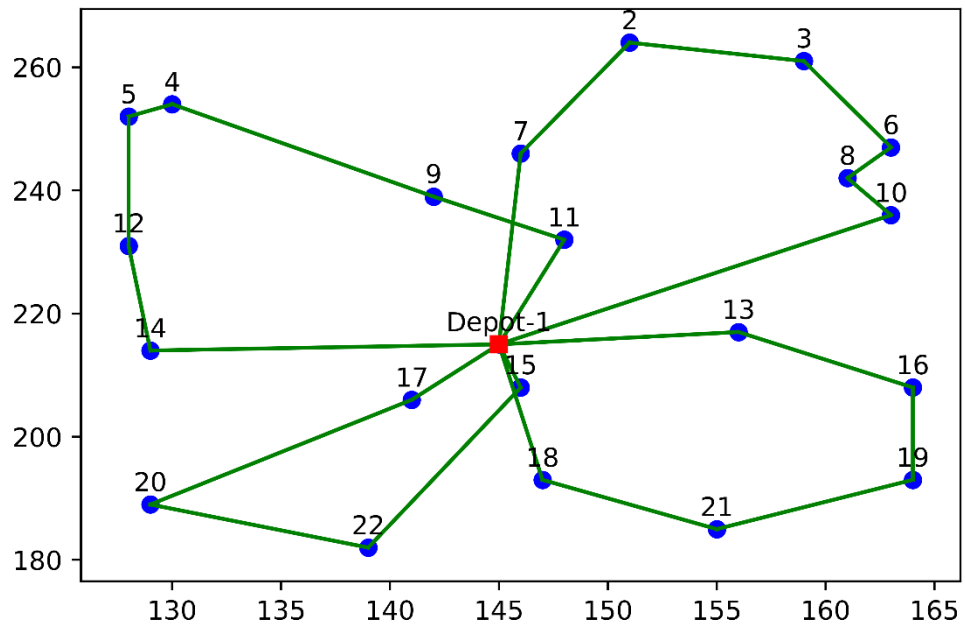
Herhangi bir zamanda dinamik talep oluşması durumunda başlangıç (statik) taleplerinden hizmet verilen talep noktaları, hizmet edilmeyi bekleyen talep noktaları ve dinamik talepler dikkate alınarak ilave araç ihtiyacı olup olmadığı kararı verilir ve mevcut bilgiler ile araçların konumu dikkate alınarak güncel dinamik rotalar elde edilir.

4.2.3. Dinamik Araç Rotalama – Senaryo – III

MDROL – HFS VRP modeli literatürde yer alan hazır veri setlerinden olan, CVRPLIB (<http://vrp.atd-lab.inf.puc-rio.br/index.php/en/>) adresinden alınan ve Set E (Christofides and Eilon, 1969) E – n22 – k4 olarak adlandırılan veri seti dinamik araç rotalama problemi için kullanılacaktır. İlgili veri setinde 1 depo ve 21 talep noktası bulunmaktadır. 6.000 kapasiteye sahip özdeş 4 adet araç kullanılarak rotalama yapılacaktır. Küçük ölçekli olarak nitelendirebileceğimiz ve bu problem kapsamında oluşturulmuş Veri Seti – I için çok kısa sürelerde çözüm elde edilebilmektedir. Talep noktası sayısı arttıkça karar değişkenlerinin üstel olarak artması nedeniyle Veri Seti – I’ e kıyasla daha büyük olarak ifade edebilecek E-n22-k4 veri setinde optimum çözüm elde edilebilmesi için gerekli süre de artmaktadır. Başlangıç durumu yani statik talepler için matematiksel model kullanılarak elde edilen minimum maliyetli optimum başlangıç rotaları, rota uzunlukları, rota ve toplam yük miktarları ile toplam çözüm süresi Tablo 13’ de yer almaktadır.

Tablo 13. E-n22-k4 Veri Seti Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri

# Rota	Seyahat Güzergahı	Rota Uzunluğu	Rota Yük Miktarı
1	1(Depo) – 10 – 8 – 6 – 3 – 2 – 7 – 1	112,17	5.600
2	1 – 11 – 9 – 4 – 5 – 12 – 14 – 1	102,58	5.400
3	1 – 13 – 16 – 19 – 21 – 18 – 1	83,67	5.900
4	1 – 17 – 20 – 22 – 15 – 1	76,86	5.600
Optimum: 375,3 Süre: 124 sn		375,3	22.500



Şekil 11. E-n22-k4 Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Sonucu

Başlangıç rota planlaması yapıldıktan sonra araçlar rotaları üzerinde ilerlerken 36. saniyede 6 adet dinamik talep meydana geldiği ve 2 adet mevcut müşteri talebinde de değişiklik olduğu (**15. müşteri 300 → 120, 18. 1000 → 1400**) durumda Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (CVRP) MDROL – HFS VRP problemine dönüşmektedir. Bu durumda dinamik talepler de dikkate alınarak rotalama yapılır ve araçların güncel rotaları elde edilir. Dinamik talepler ve taleplere ilişkin detaylar Tablo 14’de belirtilmiştir.

Tablo 14. E-n22-k4 Dinamik Talep Noktaları Koordinat ve Talep Miktarı Bilgisi – Senaryo – III

Talep Noktası	X	Y	Talep Miktarı (Q)
23	148	200	1980
24	140	220	1570

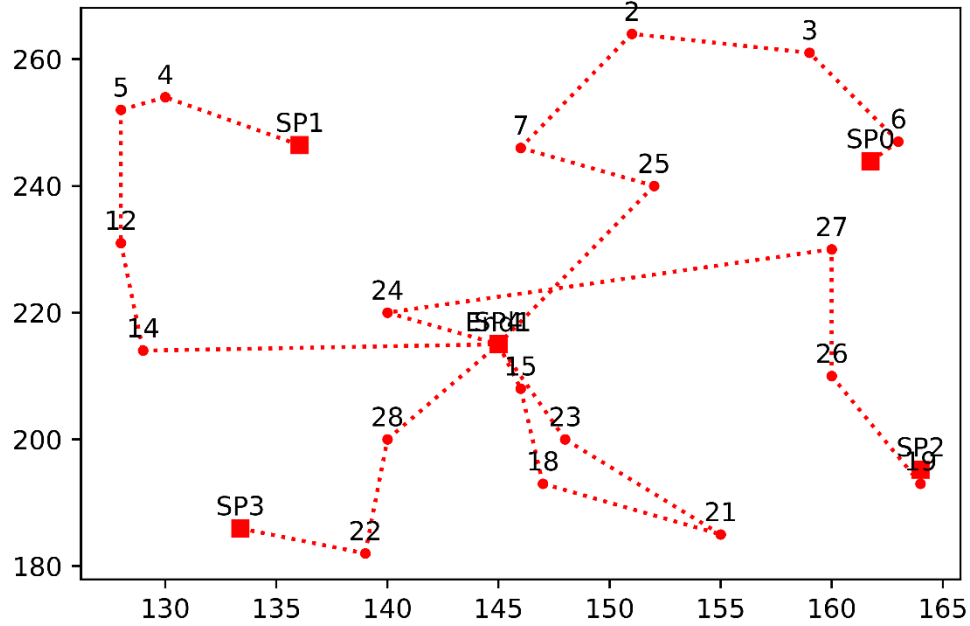
25	152	240	365
26	160	210	120
27	160	230	1.200
28	140	200	500

Mevcut araçlar ile taleplerin karşılanması mümkün olmayacağından dinamik model tarafından otomatik olarak yeni bir araç yönlendirmesi yapılır ve rota planlaması oluşturulur. Dinamik talepler geldiği anda araçların bulunduğu konumlar ve kalan kapasite bilgileri Tablo 15’de yer almaktadır.

Tablo 15. E-n22-k4 Dinamik Talep Anında Araçların Kapasiteleri ve Koordinat Bilgileri – Senaryo – III

Sanal Depolar	X	Y	Kalan Kapasite
SP ₀	161,75	243,87	4.700
SP ₁	136,05	246,43	5.300
SP ₂	164	195,22	3.800
SP ₃	133,38	185,94	1.400
SP ₄	145	215	6.000

36. saniyede gelen dinamik talepler sonrası MDROL – HFS VRP modelinin çalıştırılması sonucunda elde edilen güncel dinamik güzergah planı Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. E-n22-k4 Dinamik Talep Sonrası E-n22-k4 Veri Seti MDROL – HFS Sonucu

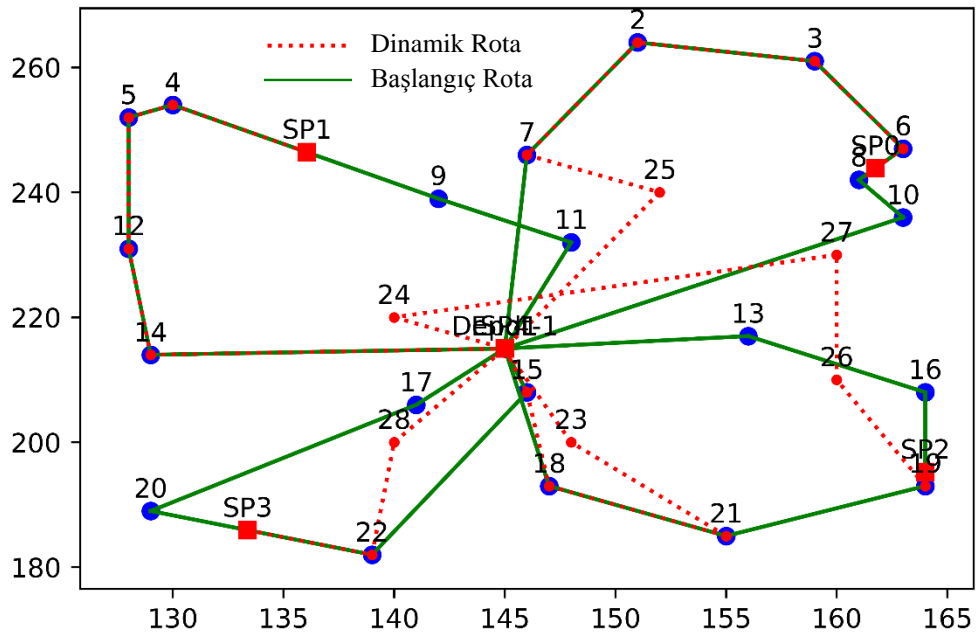
Dinamik rotalama sonrası araçların güncel seyahat güzergahları, rota uzunlukları ve araçların dinamik talep sonrası yük miktarları aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Tablo 16. E-n22-k4 MDROL – HFS Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – III

# Rota	Seyahat Güzergahı	Rota Uzunluğu	Rota Yük Miktarı
1	SP ₀ – 6 – 3 – 2 – 7 – 25 – 1 (End ₁)	79,60	4.665
2	SP ₁ – 4 – 5 – 12 – 14 – 1	66,58	4.700
3	SP ₂ – 19 – 26 – 27 – 24 – 1	69,12	3.790
4	SP ₃ – 22 – 28 – 1	40,70	1.200
5	SP ₄ – 15 – 18 – 21 – 23 – 1	65,27	5.300
Optimum: 321,3 Süre: 78 sn		321,3	19.655

Dinamik talepler de dikkate alınarak gerçekleştirilen rotalama sonucu incelendiğinde, statik ve dinamik taleplerin tam kapasiteye sahip bir aracın depodan yönlendirilmesiyle karşılayabildiği anlaşılmış, güncel güzergahlar elde edilmiş ve yaklaşık 78 saniyede de optimal sonuç elde edilmiştir.

Başlangıç rotaları ve dinamik talepler sonrası elde edilen güncel dinamik rotalar Şekil 13’de gösterilmektedir.



Şekil 13. E-n22-k4 Dinamik Araç Rotalama – Başlangıç ve Dinamik Rota – Senaryo – III

Araçların başlangıç ve dinamik rotalama detayları ise Tablo 17’de yer almaktadır.

Tablo 17. E-n22-k4 Dinamik Araç Rotalama Sonucu Rota Bilgileri – Senaryo – III

#	Rota	Seyahat Güzergahı	Rota Uzunluğu	Rota Yük Miktarı
1	Başlangıç	1(Depo) – 10 – 8 – 6 – 3 – 2 – 7 – 1	112,17	5.600
	Dinamik	1 – 10 – 8 – SP₀ – 6 – 3 – 2 – 7 – 25 – 1	115,60	5.965
2	Başlangıç	1 – 11 – 9 – 4 – 5 – 12 – 14 – 1 (End ₁)	102,58	5.400
	Dinamik	1 – 11 – 9 – SP₁ – 4 – 5 – 12 – 14 – 1	102,58	5.400
3	Başlangıç	1 – 13 – 16 – 19 – 21 – 18 – 1	83,67	5.900
	Dinamik	1 – 13 – 16 – SP₂ – 19 – 26 – 27 – 24 – 1	105,12	5.990
4	Başlangıç	1 – 17 – 20 – 22 – 15 – 1	76,86	5.600
	Dinamik	1 – 17 – 20 – SP₃ – 22 – 28 – 1	76,70	5.800
5	Başlangıç	-	-	-
	Dinamik	1 (SP₄) – 15 – 18 – 21 – 23 – 1	65,27	5.300
Dinamik Optimum: 465,3 Süre: 206 sn			465,3	28.455

Başlangıç rotaları ve dinamik rotalar değerlendirildiğinde;

- 25 numaralı dinamik talep 1. rotaya, 24, 26 ve 27 numaralı dinamik talepler 3. Rotaya, 28 numaralı dinamik talep 4., 23 numaralı talep ise 5. Rotaya eklenmiştir.
- Başlangıç çözümüne göre 3. Rotada yer alan “21.” ve talep miktarı değişen “18.” talep noktaları dinamik rotalama sonrasında 5. Rotada yer almıştır.
- Başlangıç çözümüne göre 4. Rotada yer alan “15.” talep noktası talep miktarının değişmesiyle birlikte dinamik rotalama sonrasında 5. Rotada yer almıştır.

Farklı zamanlarda yeni dinamik taleplerin gelmesi durumunda geliştirilen dinamik araç rotalama matematiksel modeli (MDROL – HFS VRP) tekrar tekrar çalıştırılarak güncel rota bilgileri elde edilir.

4.3. SEZGİSEL ALGORİTMAYLA DİNAMİK ARAÇ ROTALAMA

Küçük ölçekli problemlerde hızlı bir şekilde kesin çözüm sonucuna ulaşılabilirken büyük ölçekli problemlerde kesin çözüm yöntemleri kullanılarak çözüm elde etme süresi problem boyutuna bağlı olarak saatler, günler, aylar sürebileceği için hızlı sonuç sunabilen sezgisel algoritmaların kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Araç rotalama probleminde kullanılacak veri setleri hakkında detaylı bilgi Bölüm 4.1’de paylaşılmıştır. Kapasite kısıtlı araç rotalama veri setlerinin farklı zaman sınır (time limit) değerlerinde çalıştırılarak elde edilen veriler bu bölümde ele alınacaktır.

4.3.1. Kapasite Kısıtlı Statik Araç Rotalama ile Başlangıç Çözümü

Başlangıç çözümlerinin ve başlangıç rotaların elde edilmesi için statik CVRP matematiksel model kullanılarak 19 farklı veri setinden oluşan örneklem için 5, 30 ve 1000 saniye zaman sınırı değerlerinde çalıştırıldığında elde edilen sonuçların % optimal değerleri Tablo 18’de yer almaktadır.

Tablo 18. Kesin Çözüm Yöntemi Zaman Sınırı Bazında % Optimal Bilgisi

Veri Seti	n	5 sn	30 sn	1.000 sn
P – n19 – k2	18	98%	98%	100%
P – n20 – k2	19	99%	99%	99%
E – n23 – k3	22	100%	100%	100%
P – n23 – k8	22	-	94%	100%
B - n31 - k5	30	97%	98%	99%
E – n33 – k4	32	85%	96%	98%
A – n37 – k6	36	85%	93%	99%
B – n39 – k5	38	91%	94%	97%
F – n45 – k4	44	91%	92%	100%
A – n55 – k9	54	88%	88%	93%
A – n63 – k10	62	81%	81%	89%
tai75a	75	-	-	91%
P – n76 – k4	75	81%	84%	92%
E – n101 – k14	100	69%	70%	91%
M – n151 – k12	150	-	83%	85%
CMT10	199	-	-	-
M - n200 - k17	199	-	-	-
X – n251 – k28	250	-	-	-
X – n322 – k28	321	-	-	-

Renk skalası incelendiğinde kırmızı en düşük optimalite düzeyinde yer alan yüzde değerlerini, turuncu ve sarı geçiş değerlerini, yeşil ise en yüksek yüzde değerlerini göstermek üzere sıralanmaktadır. Tabloda kırmızı ile belirtilen hücreler düşük yüzde ile

sonuç elde edildiğini veya belirlenen zaman sınırlarında hiç sonuç elde edilemediğini ifade ederken, yeşil ise yüksek yüzdelerde optimal değere yaklaşıldığını ifade etmektedir. Belirlenen zaman sınırlarında hiç sonuç elde edilemediği durumda ise ilgili sonuç değeri “-” olarak belirtilmiş ve kırmızı renk ile gösterilmiştir. Tablo 18’de yer alan bilgiler değerlendirildiğinde matematiksel modelin küçük problem boyutlarında belirlenen zaman sınırlarında yüksek seviyede (%95+) doğruluk sağladığı ancak problem boyutu arttıkça %optimal değerlerinin düştüğü ve belirli bir talep noktası sayısından sonra ise hiç çözüm vermemeye başladığı görülmektedir.

Rassal İteratif CW Tasarruf algoritmasının ilgili zaman aralığı süresinde (5 sn., 30 sn., ve 1000 sn.) çalıştırılmış, toplam rotalama maliyetinin optimum rotalama maliyet değeriyle karşılaştırılması sonucunda elde edilen % optimal tablosu Tablo 19’da gösterilmektedir.

Tablo 19. Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritması % Optimal Bilgisi

Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritması				
Veri Seti	n	5 sn	30 sn	1.000 sn
P – n19 – k2	18	96%	96%	96%
P – n20 – k2	19	97%	97%	97%
E – n23 – k3	22	100%	100%	100%
P – n23 – k8	22	99%	99%	99%
B - n31 - k5	30	99%	99%	99%
E – n33 – k4	32	99%	99%	99%
A – n37 – k6	36	99%	99%	99%
B – n39 – k5	38	97%	99%	99%
F – n45 – k4	44	99%	99%	99%
A – n55 – k9	54	97%	97%	97%
A – n63 – k10	62	98%	98%	98%
tai75a	75	98%	98%	99%
P – n76 – k4	75	88%	91%	93%
E – n101 – k14	100	92%	93%	94%
M – n151 – k12	150	84%	89%	91%
CMT10	199	96%	97%	99%
M - n200 - k17	199	87%	88%	88%
X – n251 – k28	250	-	94%	95%
X – n322 – k28	321	-	89%	91%

Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritması ile CVRP matematiksel modelinin belirlenen zaman sınırlarında çalıştırılması sonucunda elde edilen Tablo 19 incelendiğinde; 75 talep

noktasına kadar olan problem boyutlarında %95 ve üzeri optimallik sağlandığı gözlemlenmekte ve yeşil tonlarında renklendirilmektedir. Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritması ile yaklaşık ortalama %96 optimal düzeyi sağlanmaktadır.

Matematiksel model ve sezgisel Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritma sonuçlarının belirlenen zaman kısıtlarında çalıştırılması sonucunda elde edilen bilgiler dikkate alındığında belirlenen zaman kısıtlarında daha iyi sonuç veren yöntem Tablo 20’de yeşil renk ile belirtilmiştir.

Tablo 20. Kesin Çözüm Yöntemi vs Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritması

Veri Seti	Kesin Çözüm Yöntemi			Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritması		
	5 sn	30 sn	1.000 sn	5 sn	30 sn	1.000 sn
P – n19 – k2	98%	98%	100%	96%	96%	96%
P – n20 – k2	99%	99%	99%	97%	97%	97%
E – n23 – k3	100%	100%	100%	100%	100%	100%
P – n23 – k8	0%	94%	100%	99%	99%	99%
B - n31 - k5	97%	98%	99%	99%	99%	99%
E – n33 – k4	85%	96%	98%	99%	99%	99%
A – n37 – k6	85%	93%	99%	99%	99%	99%
B – n39 – k5	91%	94%	97%	97%	99%	99%
F – n45 – k4	91%	92%	100%	99%	99%	99%
A – n55 – k9	88%	88%	93%	97%	97%	97%
A – n63 – k10	81%	81%	89%	98%	98%	98%
tai75a	0%	0%	91%	98%	98%	99%
P – n76 – k4	81%	84%	92%	88%	91%	93%
E – n101 – k14	69%	70%	91%	92%	93%	94%
M – n151 – k12	0%	83%	85%	84%	89%	91%
CMT10	0%	0%	0%	96%	97%	99%
M - n200 - k17	0%	0%	0%	87%	88%	88%
X – n251 – k28	0%	0%	0%	0%	94%	95%
X – n322 – k28	0%	0%	0%	0%	89%	91%

Belirlenen zaman aralıklarında sezgisel algoritma ile elde edilen sonuç değerleri dikkate alındığında CW tasarruf algoritması ile kısa zaman sınırlarında (5 sn.) dahi yüksek optimallik düzeyinde sonuç elde edildiği gözlemlenmektedir.

Sezgisel algoritma sonuçlarının matematiksel model ile karşılaştırılması sonucunda sezgisel algoritmanın matematiksel modele göre her bir veri seti ve zaman sınırlarında %

ne kadar iyi olduğu $\frac{\text{Matematiksel Model} - \text{Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritması}}{\text{Matematiksel Model}}$ formülü ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 21’de sunulmuştur. Matematiksel modelin sonuç vermediği sadece sezgisel (SS) algoritma ile sonuç edilen zaman sınırı değerleri SS ile ifade edilmiştir. Pozitif yüzde değerlerinde ve SS ile ifade edilen hücrelerde sezgisel algoritma, negatif yüzde değerlerinde ise matematiksel model daha iyi sonuç vermektedir.

Tablo 21. Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritmasının Kesin Çözüm Yöntemine Üstünlük Tablosu

Rassal İteratif CW Tasarruf Algoritması vs Matematiksel Model				
Veri Seti	n	5 sn	30 sn	1.000 sn
P – n19 – k2	18	-2%	-2%	-4%
P – n20 – k2	19	-2%	-3%	-3%
E – n23 – k3	22	0%	0%	0%
P – n23 – k8	22	SS	4%	-1%
B - n31 - k5	30	2%	1%	0%
E – n33 – k4	32	14%	3%	1%
A – n37 – k6	36	14%	6%	1%
B – n39 – k5	38	6%	5%	2%
F – n45 – k4	44	8%	7%	0%
A – n55 – k9	54	9%	9%	4%
A – n63 – k10	62	17%	18%	10%
tai75a	75	SS	SS	8%
P – n76 – k4	75	8%	8%	0%
E – n101 – k14	100	25%	25%	3%
M – n151 – k12	150	SS	7%	6%
CMT10	199	SS	SS	SS
M - n200 - k17	199	SS	SS	SS
X – n251 – k28	250	-	SS	SS
X – n322 – k28	321	-	SS	SS

Elde edilen bilgiler dikkate alındığında küçük örneklem boyutlarında ve uzun süreli zaman sınırlarında matematiksel modelin, büyük örneklem boyutlarında ve kısa zaman sınır değerlerinde ise sezgisel algoritmanın daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir.

4.3.2. Dinamik Araç Rotalama (MDROL – HFS VRP) Matematiksel Model ve Sezgisel Algoritma Karşılaştırması

Dinamik araç rotalama yapılması için tez kapsamında geliştirilen MDROL – HFS CVRP matematiksel modeli ile Rassal İteratif MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritmasının

performanslarının karşılaştırılabilmesi için veri seti kümesindeki her bir örnek için mevcut talep noktalarının X, Y koordinatları ve Q (talep) değerleri dikkate alınarak $\mu \pm 3 \cdot \delta$ aralığında 20 adet sanal dinamik müşteri verisi oluşturulmuş ve kapasite kısıtlı araç rotalama problemi dinamik araç rotalama problemine dönüştürülmüştür.

Her bir veri setinin optimal rotalarının ortalama rota uzunluğunun %50 anında 20 adet dinamik müşteri gelmesi durumunda CVRP, MDROL – HFS VRP' ye dönüşmektedir. Dinamik talep geldiği anda her bir veri setinde hizmet edilen müşteri sayısı, kalan talep noktası sayısı, dinamik müşteri sayısının ve toplam talep noktası sayısının yer aldığı bilgiler Tablo 22'de yer almaktadır. Dinamik hale getirilmiş veri setleri, bu bilgiler dikkate alınıp geliştirilen dinamik araç rotalama yöntemleri kullanılarak çözülecektir.

Tablo 22. Hizmet Edilen, Hizmet Edilmesi Gereken ve Dinamik Talep Noktası Bilgisi

Veri Seti	Statik Müşteri	Gidilen Müşteri	Kalan Müşteri	Dinamik Müşteri	Toplam Müşteri
P – n19 – k2	18	9	9	20	29
P – n20 – k2	19	10	9	20	29
E – n23 – k3	22	6	16	20	36
P – n23 – k8	22	12	10	20	30
B – n31 – k5	30	19	11	20	31
E – n33 – k4	32	20	12	20	32
A – n37 – k6	36	17	19	20	39
B – n39 – k5	38	21	17	20	37
F – n45 – k4	44	23	21	20	41
A – n55 – k9	54	21	33	20	53
A – n63 – k10	62	32	30	20	50
tai75a	75	32	43	20	63
P – n76 – k4	75	39	36	20	56
E – n101 – k14	100	54	46	20	66
M – n151 – k12	150	77	73	20	93
CMT10	199	99	100	20	120
M – n200 – k17	199	103	96	20	116
X – n251 – k28	250	113	137	20	157
X – n322 – k28	321	167	154	20	174

19 farklı veri setinden oluşan örneklem için farklı zamanlarda dinamik taleplerin oluşması durumunda Rassal İteratif MDROL HFS – CW Tasarruf Algoritması'nın dinamik araç

rotalama matematiksel modeline olan üstünlüğü belirlenen zaman sınırlarında karşılaştırılmış ve elde edilen üstünlük yüzdeleri ise Tablo 23’de detaylandırılmıştır.

Tablo 23. MDROL HFS – CW Tasarruf Algoritmasının MDROL – HFS Kesin Çözüm Yöntemine Üstünlük Matrisi

Veri Seti	Toplam	5 sn	30 sn	100 sn	200 sn	1.000 sn
P – n19 – k2	29	49%	48%	-9%	-9%	-14%
P – n20 – k2	29	SS	35%	18%	19%	12%
E – n23 – k3	36	SS	SS	7%	7%	-2%
P – n23 – k8	30	SS	SS	-5%	-5%	-18%
B - n31 - k5	31	2%	3%	-1%	0%	0%
E – n33 – k4	32	SS	3%	1%	-3%	-14%
A – n37 – k6	39	SS	37%	35%	-1%	-3%
B – n39 – k5	37	SS	2%	3%	2%	-4%
F – n45 – k4	41	SS	7%	10%	-10%	-19%
A – n55 – k9	53	-	SS	SS	SS	1%
A – n63 – k10	50	-	SS	SS	-20%	-23%
tai75a	63	-	100%	100%	SS	-17%
P – n76 – k4	56	SS	-10%	-10%	-10%	-34%
E – n101 – k14	66	-	SS	SS	53%	44%
M – n151 – k12	93	-	-	SS	SS	SS
CMT10	117	-	-	SS	SS	SS
M - n200 - k17	108	-	-	-	SS	SS
X – n251 – k28	157	-	-	-	-	SS
X – n322 – k28	174	-	-	-	-	SS

Her bir veri seti için farklı zamanlarda ve 20 adet dinamik talep geldiği durumunun gösterildiği Tablo 23 incelendiğinde geliştirilen sezgisel algoritmanın çok daha hızlı bir şekilde 5, 30, 100 ve 200 sn. zaman sınır değerlerinde optimal sonuçtan daha düşük maliyetli sonuçlar elde ettiği tespit edilmiştir. 1000 sn. zaman sınır değerinde ise genellikle matematiksel model tarafından daha iyi bir sonuç elde edilmektedir.

Tablo 23’de elde edilen sonuçlara örnek olarak gösterilmesi için F- n45 – k4 veri setinin 30 sn. zaman sınır değerinde çözümü gerçekleştirilmiştir. Dinamik araç rotalama çözüm yöntemleri (MDROL – HFS VRP matematiksel modeli ve sezgisel Rassal İteratif MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması) ile çözüm sağlanması sonucu elde edilen sonuçlar, grafiksel rotalar, güzergahlar, talep noktaları, güzergahların toplam talep miktarı ve araç kapasitelerine ilişkin bilgiler Şekil 14’de gösterilmektedir.

Zaman Sınırı 30 sn.	
Kesin (Exact) Çözüm	MDROL – HFS CW Tasarruf Çözüm
1	1
Rota: Depot-0-F-K-M-18-B-T-C-E-End1	Rota: Depot-0-38-15-14-13-S-P-J-Q-12-18-39-End1
Maliyet: 418.66	Maliyet: 395.30
Yük: 1692 / 1924	Yük: 1922 / 1924
2	2
Rota: Depot-1-End1	Rota: Depot-1-End1
Maliyet: 22.67	Maliyet: 22.67
Yük: 0 / 79	Yük: 0 / 79
3	3
Rota: Depot-2-5-0-G-I-R-7-39-End1	Rota: Depot-2-34-N-29-F-D-L-K-20-End1
Maliyet: 295.22	Maliyet: 479.07
Yük: 1986 / 2010	Yük: 1826 / 2010
4	4
Rota: Depot-3-34-N-29-30-4-End1	Rota: Depot-3-4-7-6-C-I-T-5-End1
Maliyet: 363.57	Maliyet: 334.78
Yük: 546 / 551	Yük: 547 / 551
5	5
Rota: Depot-4-D-11-13-15-19-H-L-20-End1	Rota: Depot-4-9-A-End1
Maliyet: 316.22	Maliyet: 63.85
Yük: 1901 / 2010	Yük: 919 / 2010
6	6
Rota: Depot-5-12-14-S-Q-J-P-38-28-36-8-6-End1	Rota: Depot-5-8-R-O-G-28-30-36-End1
Maliyet: 483.73	Maliyet: 291.65
Yük: 1678 / 2010	Yük: 1915 / 2010
7	7
Rota: Depot-6-9-A-End1	Rota: Depot-6-B-E-11-19-H-M-End1
Maliyet: 63.85	Maliyet: 232.36
Yük: 919 / 2010	Yük: 1593 / 2010
Toplam Maliyet: 1963.91	Toplam Maliyet: 1819.68
Toplam Yük: 8722 / 10594	Toplam Yük: 8722 / 10594

Şekil 14. F- n45 – k4 Veri Seti MDROL – HFS Matematiksel Model vs. Önerilen Algoritma

4.3.3. Farklı Zamanlarda Gelen Birden Çok Dinamik Talepli Dinamik Araç Rotalama

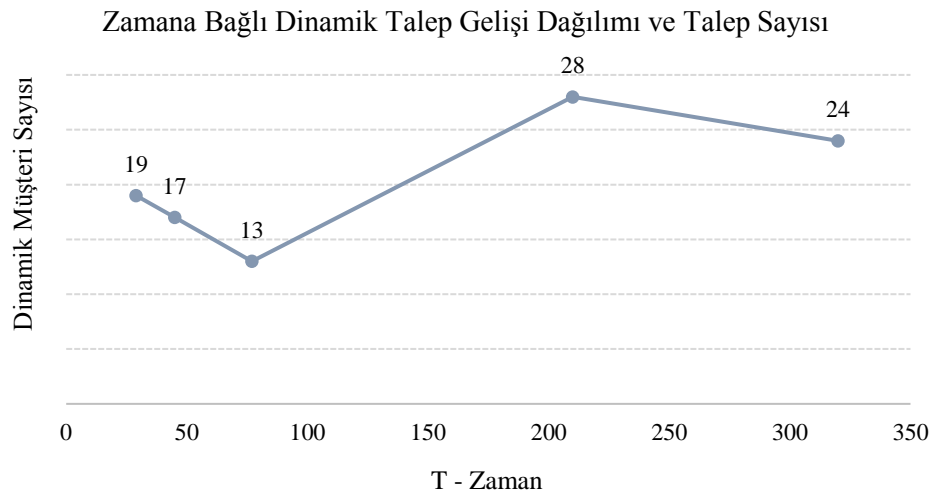
Tablo 23’de tek seferde toplu olarak dinamik taleplerin geldiği durum için farklı veri setlerinde belirlenen zaman sınır değerlerinde elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı durum analiz edilmiştir. Bu aşamada ise P-n76-k4 veri seti için 5 farklı zamanda farklı miktarlardan oluşan dinamik talepler dikkate alınarak dinamik araç rotalama gerçekleştirilecektir.

Dinamik talep oluşma zamanları ve dinamik müşteri sayısı Tablo 24’de yer almaktadır. Dinamik talep gelişi, ortalaması 135 olan Exponential dağılıma, dinamik müşteri sayısı ise ortalaması 20 olan Poisson dağılıma göre üretilmiştir.

Tablo 24. Dinamik Müşteri Geliş Zamanı ve Adedi

#	Dinamik Talep Geliş Anı	Dinamik Müşteri Sayısı
1	29	19
2	45	17
3	77	13
4	210	28
5	320	24

Dinamik müşterilerin zamana bağlı geliş dağılımı ve miktarı aşağıda yer alan Şekil 15’de gösterilmiştir.



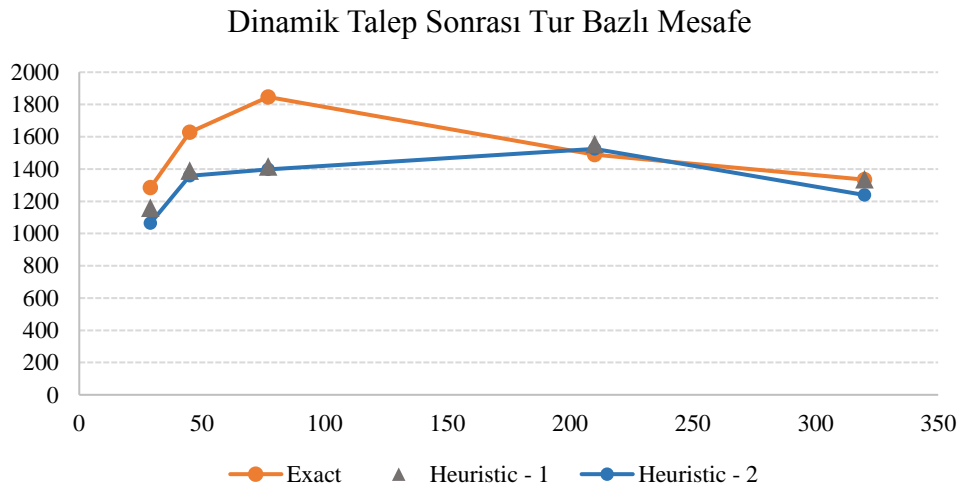
Şekil 15. Zamana Bağlı Müşteri Geliş Dağılımı

Dinamik araç rotalama probleminin kesin çözüm yöntemi ve sezgisel çözüm yönteminin farklı zaman sınır değerlerinde çözümü için kullanılan veriler Tablo 25’de yer almaktadır.

Tablo 25. Dinamik Araç Rotalama Zaman Sınır Değerleri

Zaman Sınır Değerleri				
#	Dinamik Talep Zamanı / Sayısı	Exact	Heuristic – 1	Heuristic – 2
1	29. sn / 19	100	5	100
2	45. sn / 17	200	15	200
3	77. sn / 13	300	15	300
4	210. sn / 28	200	15	200
5	320. sn / 24	100	5	100
		900	55	900

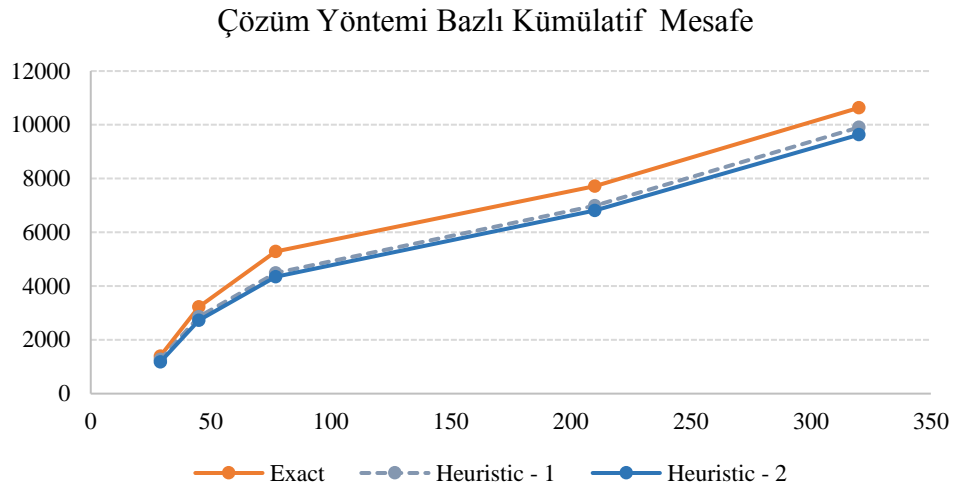
Her bir dinamik talep sonrası hizmet edilmesi gereken statik talepler ve dinamik talepler dahil talep noktaları dikkate alınarak oluşturulan yeni dinamik rotaların maliyetleri tez kapsamında geliştirilen dinamik araç rotalama çözüm yöntemlerinin (kesin çözüm yöntemi sunan dinamik araç rotalama matematiksel modeli ve sezgisel Rassal İteratif MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması) farklı zaman sınır değerleri için çalıştırılması sonucunda elde edilen bilgiler Şekil 16’da yer almaktadır.



Şekil 16. Dinamik Talepler Sonrası Oluşturulan Dinamik Rota Maliyetleri

Grafik sonuçları değerlendirildiğinde belirlenen zaman sınır değerlerinde sezgisel algoritma ile elde edilen sonuçların genellikle daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir.

Kesin çözüm yöntemi (Exact) için toplam zaman sınır değeri 900 sn, MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması için ise 55 sn. (Heuristic – 1) ve 900 sn. (Heuristic – 2) olarak 3 farklı kümülatif maliyet grafiği Şekil 17’de gösterilmiştir.



Şekil 17. Dinamik Rotaların Kümülatif Mesafesi

Yukarıda yer alan grafik incelendiğinde önerilen sezgisel algoritma sonuçlarının kesin çözüm yöntemi ile elde edilen sonuçlar daha iyi olduğu gözlemlenmektedir.

P-n76-k4 veri setinin 5 farklı zamanda gelen dinamik talepler dikkate alınarak rotalanması sonucu her bir çözüm aralığında sezgisel modelin farklı zaman sınır değerlerinde çalıştırılan versiyonlarının matematiksel modelden ne kadar iyi olduğu karşılaştırması Tablo 26’da yer almaktadır.

Tablo 26. MDROL - HFS CW Tasarruf Sezgisel Algoritmasının Kesin Çözüm Yöntemine Üstünlüğü

#	Dinamik Talep Zamanı / Sayısı	Toplam Müşteri Sayısı	Exact	Heuristic – 1	Heuristic – 2
1	29. sn / 19	78	1.284	10%	17%
2	45. sn / 17	91	1.628	15%	17%
3	77. sn / 13	99	1.847	23%	24%
4	210. sn / 28	84	1.490	-4%	-2%
5	320. sn / 24	59	1.335	0%	7%
Toplam			7.584	10%	13%

Kesin çözüm yöntemi ile aynı zaman sınır değerinde Rassel İteratif MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması’nın çalıştırılması sonucunda ortalama %13 daha iyi sonuç elde edilmiştir. Önerilen sezgisel Rassel İteratif MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritması’nın toplam 55 sn. (Heuristic – 1) zaman sınır değerinde çalıştırılması sonucunda kesin çözüm yöntemine göre ortalama %95 sürede kesin çözüm yöntemiyle elde edilen sonuçtan ortalama %10 daha iyi bir çözüm elde edilmektedir.

5. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Küreselleşen ekonomi, mobilitenin artması, dünya nüfusundaki artış ile orantılı olarak tüketim ihtiyaçlarının artması, ulaşım ve dağıtım sistemlerinin önemini ve kullanımını artırmaktadır. Günümüzde yoğun rekabet ortamında şirketlerin ayakta kalabilmesi için en önemli noktalardan biri, kurmuş oldukları tedarik zincirinin etkinliği ve etkin olarak yönetilmesidir. Tedarik zincirinde; hammaddelerin üretimi aksamayacak bir planlamada fabrikaya getirilmesi, fabrika içi ürün akışlarının sağlanması ve ürünlerin müşterilere zamanında ve en az maliyetle teslim edilmesinde taşıma kararlarının gerekliliği ve önemi ön plana çıkmaktadır. Bu durum araç rotalama probleminin şirket için önemini göstermektedir. Etkin bir dağıtım planı yapılarak ürün maliyetlerinin azaltılması ve müşteri memnuniyetinin artırılması ile rekabet gücünün artırılması sağlanabilir.

Ulaşım teknolojilerinin yoğun bir şekilde kullanıma sahip olması ve teknolojik gelişmelerle birlikte karmaşıklık düzeyinin artması nedeniyle günlük hayattaki yeri ve önemi de giderek artmaktadır. Araç rotalama problemleri de kapsamlı uygulama alanına sahip karmaşık bir problem olarak nitelendirilebilmektedir.

Araç rotalama problemi günümüzde hammadde tedarikinde, benzin istasyonları akaryakıt dağıtım süreçlerinde, belediye atık toplama süreçlerinde, zincir marketlerin ürün tedarikinde ve kargo dağıtım süreçlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Dinamik araç rotalama probleminin çözümü için geliştirilen matematiksel model ve sezgisel algoritma; literatürde yer alan farklı boyutlardaki kapasite kısıtlı veri setleri üzerinde test edilmiş ve çözüm yöntemlerinin performansı, elde edilen sonuçlar üzerinden karşılaştırılmıştır. Amaç fonksiyon değerleri, bu değerlerin elde edilmesi için ihtiyaç duyulan süreler ve çözüm yöntemlerinin performansları incelenmiştir.

Küçük boyutlu problemlerde optimal sonucun elde edilebilmesi ve büyük boyutlu problemlerde kullanılması için planlanan algoritma sonuçlarının performansının değerlendirilmesi için matematiksel model kullanılmaktadır. Büyük boyutlu problemlere

kısa süre sürede yüksek doğruluk oranına sahip çözümler bulunması için ise sezgisel algoritmanın kullanılması hedeflenmektedir.

Bu tez kapsamında en kısa sürede minimum maliyetli dinamik araç rotalama yapılması hedeflenmiştir. Dinamik araç rotalama probleminin çözümü için matematiksel model ve sezgisel algoritma önerilmiştir. Büyük boyutlu problemlerde optimuma yakın çözüm elde edilebilmesi, geliştirilen sezgisel algoritma ile garanti altına alınmıştır.

Geliştirilen matematiksel model ve sezgisel algoritma minimum maliyetli rota kümesinin bulunması amacıyla farklı zaman kısıtlarında literatürde yer alan 19 veri seti için çalıştırılmıştır. İlgili zaman kısıtlarında başlangıç çözümü sunan Rassal İteratif CW Tasarruf algoritması ile kapasite kısıtlı araç rotalama problemi matematiksel model sonuçları karşılaştırılmıştır. Başlangıç çözümü için 30 saniye zaman kısıtlı sürede elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde sezgisel algoritmanın 19 veri setinin 17'sinde daha iyi (daha az maliyetli) çözüm sağladığı görülmektedir. Dinamik rotalama yapılması amacıyla geliştirilmiş MDROL – HFS VRP matematiksel modeli ile sezgisel MDROL – HFS CW Tasarruf Algoritmasının performansları değerlendirilmiştir. Problem boyutu arttıkça karar değişkeni sayısının üstel olarak artması nedeniyle matematiksel model ile belirlenen zaman kısıtı içerisinde 5 / 19 veri seti için bir sonuç elde edilememiştir. Geliştirilen sezgisel algoritma ile tüm veri setleri için hızlı çözüm sağlanmıştır. Dinamik araç rotalama problemlerinin doğası gereği hızlı karar alınması ihtiyacı göz önüne alındığında 5 ve 30 saniye zaman kısıtında önerilen sezgisel algoritmanın matematiksel modele karşı bariz üstünlüğü gözlemlenmektedir.

Bu tez kapsamında dinamik araç rotalama yapılırken minimum maliyetli rota kümesinin elde edilmesi amaçlanmıştır. İlerleyen çalışmalarda; taleplerin öncelik durumunun söz konusu olduğu dinamik araç rotalama problemleri için mevcut model uyarlanabilir. Araçların sahip olduğu yük miktarına bağlı yakıt / batarya tüketiminin göz önünde bulundurulduğu minimum maliyetli rotalama çalışması gerçekleştirilebilir.

Dinamik araç rotalama yapılması durumunda; trafik yoğunluğunda ve hava kirliliğinde azalma, zamandan kazanç, yakıt (elektrik veya petrol türevi) ve araç bakım maliyetlerinde azalma hedeflenmektedir. Bunun yanı sıra üretim süreçlerindeki fırsat maliyetlerinde ve üretim maliyetleri içerisindeki lojistik maliyetlerinde azalma öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdirad, M., Krishnan, K., & Gupta, D. (2021). A two-stage metaheuristic algorithm for the dynamic vehicle routing problem in Industry 4.0 approach. *Journal of Management Analytics*, 8(1), 69-83.
- Albayrak, S. (2019). Okul Servisi Araçlarını Rotalama Problemi için Yenilikçi Bir Yaklaşım.
- Aydoğdu, B., & Özyörük, B. (2020). Mathematical model and heuristic approach for solving dynamic vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Random iterative local search variable neighborhood descent search. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2), 563-580.
- Azi, N., Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (2012). A dynamic vehicle routing problem with multiple delivery routes. *Annals of Operations Research*, 199(1), 103-112.
- Bektas, T., Repoussis, P. P., & Tarantilis, C. D. (2014). Chapter 11: Dynamic vehicle routing problems. In *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, Second Edition (pp. 299-347). *Society for Industrial and Applied Mathematics*.
- Bodin, L. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews, the state of the art. *Comput. Oper. Res.*, 10(2), 63-211.
- Bolanos, R., Escobar, J., & Echeverri, M. (2018). A metaheuristic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous fleet. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(4), 461-478.
- Braekers, K., Ramaekers, K., and Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300–313
- Brandão, J. (2004). A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 157(3), 552-564.

- Chandler, P. R., & Patcher, M. (1998). Research Issues in Autonomous Control of Tactical UAVs. *Proceedings of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania*, 394-398.
- Chen, S., Chen, R., Wang, G. G., Gao, J., & Sangaiah, A. K. (2018). An adaptive large neighborhood search heuristic for dynamic vehicle routing problems. *Computers & Electrical Engineering*, 67, 596-607.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2001). Supply chain management. *Prentice-Hall* (p. 457).
- Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4), 568-581.
- Cordeau, J. F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J. Y., & Semet, F. (2002). A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, 53(5), 512-522.
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6 (1), 80-91.
- Derigs, U., & Reuter, K. (2009). A simple and efficient tabu search heuristic for solving the open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 60(12), 1658-1669.
- Doyuran, T. (2008). Enhancements of Clarke-Wright savings heuristics for the capacitated vehicle routing problem (Doctoral dissertation).
- Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472-1483.
- Ercan, C., & Gencer, C. (2013). İnsansız Hava Sistemleri Rota Planlaması Dinamik Çözüm Metotları ve Literatür Araştırması. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1(2), 51-72.
- Ercan, C., & Gencer, C. (2018). A Decision Support System For Dynamic Heterogeneous Unmanned Aerial System Fleets. *Gazi University Journal of Science*, 31(3), 863-877.

- Euchi, J., Yassine, A., & Chabchoub, H. (2015). The dynamic vehicle routing problem: Solution with hybrid metaheuristic approach. *Swarm and Evolutionary Computation, 21*, 41-53.
- Fleszar, K., Osman, I. H., & Hindi, K. S. (2009). A variable neighbourhood search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research, 195(3)*, 803-809.
- Fu, Z., Eglese, R., & Li, L. Y. (2005). A new tabu search heuristic for the open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society, 56(3)*, 267-274.
- Gaskell, T. J. (1967). Bases for vehicle fleet scheduling. *Journal of the Operational Research Society, 18(3)*, 281-295.
- Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J. Y., & Taillard, É. (1999). Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching. *Transportation Science, 33(4)*, 381-390.
- Girard, S., Renaud, J., & Boctor, F. F. (2005). A Simple and Efficient Perturbation Heuristic to solve the Vehicle Routing Problem.
- Golden, B. L., Magnanti, T. L., & Nguyen, H. Q. (1977). Implementing vehicle routing algorithms. *Networks, 7(2)*, 113-148.
- Golden, B. L., Raghavan, S., & Wasil, E. A. (Eds.). (2008). The vehicle routing problem: latest advances and new challenges (Vol. 43). *Springer Science & Business Media*.
- Haghani, A., & Jung, S. (2005). A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times. *Computers & Operations Research, 32(11)*, 2959-2986.
- Karakatič, S., & Podgorelec, V. (2015). A survey of genetic algorithms for solving multi depot vehicle routing problem. *Applied Soft Computing, 27*, 519-532.
- Khouadjia, M. R., Sarasola, B., Alba, E., Jourdan, L., & Talbi, E. G. (2012). A comparative study between dynamic adapted PSO and VNS for the vehicle routing problem with dynamic requests. *Applied Soft Computing, 12(4)*, 1426-1439.

- Kuo, R. J., Wibowo, B. S., & Zulvia, F. E. (2016). Application of a fuzzy ant colony system to solve the dynamic vehicle routing problem with uncertain service time. *Applied Mathematical Modelling*, 40(23-24), 9990-10001.
- Lahyani, R., Gouguenheim, A. L., & Coelho, L. C. (2019). A hybrid adaptive large neighbourhood search for multi-depot open vehicle routing problems. *International Journal of Production Research*, 57(22), 6963-6976.
- Lalla-Ruiz, E., Expósito-Izquierdo, C., Taheripour, S., & Voß, S. (2016). An improved formulation for the multi-depot open vehicle routing problem. *OR Spectrum*, 38(1), 175-187.
- Laporte, G. (2007). What You Should Know about the Vehicle Routing Problem. *Naval Research Logistics (NRL)*, 54(8), 811–819.
- Larsen, A. (2000). The dynamic vehicle routing problem (Doctoral dissertation, Institute of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark).
- Larsen, A., Madsen, O. B. G., & Solomon, M.G. (2007). *Dynamic Fleet Management Concepts, Systems, Algorithms, and Case Studies: Classification of Dynamic Vehicle Routing Systems (38): 19-40*, Springer Science & Business Media. Springer.
- Letchford, A. N., Lysgaard, J., & Eglese, R. W. (2007). A branch-and-cut algorithm for the capacitated open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 58(12), 1642-1651.
- Liao, T. Y., & Hu, T. Y. (2011). An object-oriented evaluation framework for dynamic vehicle routing problems under real-time information. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12548-12558.
- Liu, R., Jiang, Z., & Geng, N. (2014). A hybrid genetic algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem. *OR Spectrum*, 36(2), 401-421.
- Lund K., Madsen O., & Rygaard J. (1996). Vehicle routing problems with varying degrees of dynamism. *Technical report, IMM. Department of Mathematical Modeling, Technical University of Denmark, Kogens, Lyngby, Denmark.*

- Marinakis, Y., & Marinaki, M. (2014). A bumble bees mating optimization algorithm for the open vehicle routing problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 15, 80-94.
- Mavrovouniotis, M., & Yang, S. (2015). Ant algorithms with immigrants schemes for the dynamic vehicle routing problem. *Information Sciences*, 294, 456-477.
- McDonald, J. J. (1972). Vehicle scheduling—A case study. *Journal of the Operational Research Society*, 23(4), 433-444.
- Messaoud, E., El Idrissi, A. E. B., & Alaoui, A. E. (2018). The green dynamic vehicle routing problem in sustainable transport. In *2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)* (pp. 1-6). IEEE.
- Montemanni, R., Gambardella, L. M., Rizzoli, A. E., & Donati, A. V. (2005). Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem. *Journal of Combinatorial Optimization*, 10(4), 327-343.
- Okulewicz, M., & Mańdziuk, J. (2017). The impact of particular components of the PSO-based algorithm solving the Dynamic Vehicle Routing Problem. *Applied Soft Computing*, 58, 586-604.
- Okulewicz, M., & Mańdziuk, J. (2019). A metaheuristic approach to solve Dynamic Vehicle Routing Problem in continuous search space. *Swarm and Evolutionary Computation*, 48, 44-61.
- Ouertani, N., Ramdhan, H. B., Krichen, S., Nouaouri, I., & Allaoui, H. (2018). A new evolutionary method to deal with the dynamic vehicle routing problem. In *2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD)* (pp. 1-5). IEEE.
- Paessens, H. (1988). The savings algorithm for the vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 34(3), 336-344.
- Pessoa, A., De Aragao, M. P., & Uchoa, E. (2008). Robust branch-cut-and-price algorithms for vehicle routing problems. In *The vehicle routing problem: Latest advances and new challenges* (pp. 297-325). Springer, Boston, MA.

- Pichpibul, T., & Kawtummachai, R. (2013). A heuristic approach based on clarke-wright algorithm for open vehicle routing problem. *The Sscientific Wworld Jjournal*, 2013.
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., & Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1), 1-11.
- Psaraftis, H. N. (1980). A dynamic-programming solution to the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem. *Transportation Science*, 14(2), 130-154.
- Psaraftis, H. N., Wen, M., & Kontovas, C.A. (2016). Dynamic Vehicle Routing Problems: Three Decades and Counting. *Networks*, 67(1), 3-31.
- Psaraftis, H.N. (1988). Vehicle routing: methods and studies, *Elsevier Science Publishers, Amsterdam*.
- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., & Póvoa, A. P. B. (2020). Multi-depot vehicle routing problem: a comparative study of alternative formulations. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 23(2), 103-120.
- Rand, G. K. (2009). The life and times of the Savings Method for Vehicle Routing Problems. *ORiON*, 25(2).
- Ritzinger, U., Puchinger, J., & Hartl, R. F. (2016). A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems. *International Journal of Production Research*, 54(1), 215-231.
- Sabar, N. R., Bhaskar, A., Chung, E., Turkey, A., & Song, A. (2019). A self-adaptive evolutionary algorithm for dynamic vehicle routing problems with traffic congestion. *Swarm and eEvolutionary Ccomputation*, 44, 1018-1027.
- Sarasola, B., Doerner, K. F., Schmid, V., & Alba, E. (2016). Variable neighborhood search for the stochastic and dynamic vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, 236(2), 425-461.

- Sariklis, D., & Powell, S. (2000). A heuristic method for the open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 51(5), 564-573.
- Schrage, L. (1981). Formulation and structure of more complex/realistic routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2), 229-232.
- Schyns, M. (2015). An ant colony system for responsive dynamic vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 245(3), 704-718.
- Soonpracha, K., Mungwattana, A., Janssens, G. K., & Manisri, T. (2014). Heterogeneous VRP Review and Conceptual Framework. In *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (Vol. 2)*.
- Soto, M., Sevaux, M., Rossi, A., & Reinholz, A. (2017). Multiple neighborhood search, tabu search and ejection chains for the multi-depot open vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 107, 211-222.
- Şevkli, A. Z., & Güler, B. (2017). A multi-phase oscillated variable neighbourhood search algorithm for a real-world open vehicle routing problem. *Applied Soft Computing*, 58, 128-144.
- Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2002). Distribution of fresh meat. *Journal of Food Engineering*, 51(1), 85-91.
- Tillman, F. A. (1969). The multiple terminal delivery problem with probabilistic demands. *Transportation Science*, 3(3), 192-204.
- Tillman, F. A., & Cain, T. M. (1972). An upperbound algorithm for the single and multiple terminal delivery problem. *Management Science*, 18(11), 664-682.
- Toth, P., & Vigo, D. (2014). Vehicle routing: problems, methods, and applications. *Society for Industrial and Applied Mathematics*.
- Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2002). The vehicle routing problem. *Society for Industrial and Applied Mathematics*.

- Uchoa, E., Pecin, D., Pessoa, A., Poggi, M., Vidal, T., & Subramanian, A. (2017). New benchmark instances for the capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 257(3), 845-858.
- Vigo, D. (1996). A heuristic algorithm for the asymmetric capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 89(1), 108-126.
- Vincent, F. Y., & Lin, S. Y. (2015). A simulated annealing heuristic for the open location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 62, 184-196.
- Wilson, N. H. M., & Colvin, N. J. (1977). Computer control of the Rochester dial-a-ride system (No. 77). *Massachusetts Institute of Technology, Center for Transportation Studies*.
- Xiang, X., Qiu, J., Xiao, J., & Zhang, X. (2020). Demand coverage diversity based ant colony optimization for dynamic vehicle routing problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 91, 103582.
- Yellow, P. C. (1970). A computational modification to the savings method of vehicle scheduling. *Journal of the Operational Research Society*, 21(2), 281-283.
- Yousefikhoshbakht, M., Didehvar, F., & Rahmati, F. (2014). Solving the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem by a combined metaheuristic algorithm. *International Journal of Production Research*, 52(9), 2565-2575.