



## Mathematical model and heuristic approach for solving dynamic vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Random iterative local search variable neighborhood descent search

Burak Aydoğdu\*<sup>ID</sup>, Bahar Özyörük<sup>ID</sup>

Gazi University, Department of Industrial Engineering, Ankara, 06570, Turkey

### Highlights:

- In this study Dynamic Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery problem discussed.
- A new mathematical model has been developed for solving problem.
- A new heuristic algorithm called Random iterative local search variable neighborhood descent search has been developed with used hyper heuristics.

### Keywords:

- Dynamic vehicle routing problem
- Simultaneous pickup and delivery
- Hyper heuristics
- Local Search
- Mathematical model

### Article Info:

Research Article  
Received: 29.11.2018  
Accepted: 15.05.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.490179

### Correspondence:

Author: Burak Aydoğdu  
e-mail:  
burakaaydogdu@gmail.com  
phone: +90 505 700 58 05

### Graphical/Tabular Abstract

N	TYPE	R – ILS – VND			
		AIBS	NPRBS	AST	APMM
20	W	36,11	3	0,21	0,74
20	X	36,26	3	0,24	0,52
20	Y	36,00	1	0,25	1,86
20	Z	44,85	3	0,17	0,59
AVERAGE (TOTAL)		38,31	10	0,22	0,93
30	W	33,76	1	0,39	3,78
30	X	47,50	1	0,57	4,54
30	Y	41,02	0	0,68	3,97
30	Z	40,83	0	0,36	4,98
AVERAGE (TOTAL)		40,78	2	0,50	4,32
40	W	31,61	0	0,73	5,56
40	X	45,27	0	1,17	6,13
40	Y	37,83	0	1,03	5,35
40	Z	47,50	0	0,50	5,39
AVERAGE (TOTAL)		40,55	0	0,86	5,61
GENERAL AVERAGE (TOTAL)		39,88	12	0,52	3,62

AIBS (%): Average improvement from the beginning solution / NPRBS: Number of problems with the best solution  
AST (sec): Average solution time / APMM (%): Average percentage deviation from mathematical model results

Table A. Computational results for heuristic algorithm

**Purpose:** The aims of this study are develop a mathematical model for solving small and medium size Dynamic Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery (DVRPSPD) and develop a heuristic algorithm to find a solution in a short time for solve large size DVRPSPD.

### Theory and Methods:

Firstly a mathematical model has been developed for solving the DVRPSPD. Small and medium-sized problems were generated and solved for evaluate the effectiveness of the proposed model. Then a new algorithm called Random Iterative Local Search Variable Neighborhood Descending (R – ILS - VND) algorithm has been developed. Order of the neighborhood structures has been changed continuously according to the decreasing permutation method with the hyper heuristics at R – ILS – VND algorithm. In order to evaluate the effectiveness of the developed algorithm, the results obtained with the mathematical model were used. When the results are analyzed, it is seen that the heuristic algorithm has similar results to the mathematical model. Finally, the problems were solved by using the proposed R - ILS - VND algorithm and the results were shared.

### Results:

The results obtained with the mathematical model were evaluated and the solution time increased exponentially as the problem size increased. In this study, heuristic algorithms were used to solve the problem in a short time. In order to evaluate the effectiveness of the developed algorithm, the results obtained with the mathematical model were used. When the results are analyzed, it is seen that the heuristic algorithm has similar results to the mathematical model. Finally, the problems were solved by using the proposed R - ILS - VND algorithm and the results were shared.

### Conclusion:

In this study, a mathematical model and heuristic algorithm were used for solving DVRPSPD. Proposed mathematical model and heuristic algorithm give better results.



## Dinamik eş zamanlı topla dağıt araç rotalama probleminin çözümü için matematiksel model ve sezgisel yaklaşım: Rassal iteratif yerel arama değişken komşu iniş algoritması

Burak Aydoğdu\*<sup>ID</sup>, Bahar Özyörük<sup>ID</sup>

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe Ankara, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Mikro Bu çalışmada Dinamik Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi ele alınmıştır
- Problemi çözmek için yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir
- Üst (hyper) sezgiseller kullanılarak Rassal İteratif Yerel Arama Değişken Komşu İniş algoritması adında yeni bir algoritma geliştirilmiştir

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.11.2018

Kabul: 15.05.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.490179

### Anahtar Kelimeler:

Dinamik araç rotalama problem

Eşzamanlı topla dağıt

Üst sezgisel

yerel arama

matematiksel modelleme

### ÖZET

Firmaların dağıtım ve toplama taleplerini karşılayacak en uygun rotaların bulunması için Araç Rotalama Problemleri (ARP) sıkça kullanılmaktadır. Gerçek hayatta, gün içerisinde gelen yeni toplama taleplerinin dolaşımında olan araçlar tarafından karşılanması firmaların taşıma maliyetlerini azaltacaktır. Bu çalışmada müşterilerden gelen yeni toplama taleplerinin dolaşımında olan araçlar tarafından karşılanabilmesi amacıyla Dinamik Eş Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (DETD\_ARP) ele alınmış ve problemin çözümü için yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modelin etkinliğini araştırmak için literatürde yer alan test problemleri kullanılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Matematiksel modelde problem boyutu arttıkça çözüm süresinin üstel olarak arttığı görülmüştür. Bu yüzden DETD\_ARP'yi kısa sürede çözebilmek amacıyla sezgisel algoritmaların kullanılmasına karar verilmiştir. Çalışma kapsamında Rassal İteratif Yerel Arama Değişken Komşu İniş (R-İYA-DKİ) algoritması adında yeni bir algoritma geliştirilmiştir. R-İYA-DKİ'de üst (hyper) sezgiseller kullanılarak komşuluk yapılarının uygulama sırası azalan permütasyon yöntemine göre sürekli olarak değiştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın etkinliğini değerlendirmek için çalışma kapsamında matematiksel model ile elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Sonuçlara bakıldığında geliştirilen sezgisel algoritmanın matematiksel model ile elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Son olarak orta ve büyük boyutlu problemler önerilen R-İYA-DKİ algoritması ile çözülmüş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

## Mathematical model and heuristic approach for solving dynamic vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Random iterative local search variable neighborhood descent search

### H I G H L I G H T S

- Modeling In this study Dynamic Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery problem discussed
- A new mathematical model has been developed for solving problem
- A new heuristic algorithm called Random Iterative Local Search Variable Neighborhood Descent Search has been developed with used hyper heuristics

### Article Info

Research Article

Received: 29.11.2018

Accepted: 15.05.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.490179

### Keywords:

Dynamic vehicle routing

problem

simultaneous pickup and

delivery

hyper heuristics

local Search

mathematical model

### ABSTRACT

Vehicle Routing Problems (VRP) are used to find the most suitable routes for fulfill the delivery and pickup demands of the companies. In real life, new pickup requests received by routed vehicles will provide a significant reduction in transport costs. As a result, a new mathematical model called as Dynamic Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery (DVRPSPD) has been developed for new pickup requests received by routed vehicles. Small and medium-sized problems were generated and solved for evaluate the effectiveness of the proposed model. The results obtained with the mathematical model were evaluated. The solution time increased exponentially as the problem size increased. In this study, heuristic algorithms were used to solve the problem in a short time. A new algorithm called Random Iterative Local Search Variable Neighborhood Descending (R-ILS-VND) algorithm has been developed. Order of the neighborhood structures was changed continuously by decreasing permutation method at R-ILS-VND algorithm. In order to evaluate the effectiveness of the developed algorithm, the results were compared to the mathematical models results. When the results are analyzed, the heuristic algorithm has similar results to the mathematical model. Finally, the medium and large size problems were solved by using the proposed R-ILS-VND algorithm and the results were analyzed.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: burakaaydogdu@gmail.com, bahar@gazi.edu.tr / Tel: +90 505 700 58 05

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Araç rotalama problemi (ARP) ilk olarak 1959 yılında Dantzig ve Ramser [1] tarafından yapılan bir çalışmada ele alınmıştır. Benzin istasyonlarına benzin dağıtımını yapmak için bir matematiksel model geliştirerek problemi çözmüşlerdir. 1964 yılında Clarke ve Wright [2] araç rotalama probleminin çözümü için tasarruf algoritmasını önermişler ve bu çalışmalardan sonra literatürde ARP'ye ilgi daha da artmıştır [3]. Toplama ve dağıtma, taşıma, atık toplama, gazete dağıtımı gibi gündelik hayatta karşılaşılan birçok konu, elli yılı aşkın süredir yöneylem araştırması kapsamında ele alınan ARP'ler ile çözülmeye çalışılmış ve bu konuda birçok matematiksel model ve kesin ya da yakın çözümler veren algoritmalar geliştirilmiştir [4, 5, 6].

Literatürde ARP'nin zaman pencereli, mesafe kısıtlı, topladağıt gibi birçok farklı türü bulunmaktadır. Bu ARP türleri genellikle gerçek hayattaki problemlere uygunluk göstermesi için problemin değişken ve kısıt sayısının gerçek hayattaki durumlara uyarlanması ile elde edilmiştir [7]. Böylece değişen ihtiyaçlar ve kısıtlar doğrultusunda literatüre yeni araç rotalama problemleri eklenmiştir.

Gün içerisinde gelen yeni toplama taleplerinin dolaşımda olan araçlar tarafından karşılanması firmaların taşıma maliyetlerini azaltacağı yaklaşımdan yola çıkarak, bu çalışma kapsamında literatürde yer alan Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (ETD ARP) ve Dinamik Araç Rotalama Problemi (DARP) birlikte ele alındığı Dinamik Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (DETD ARP) incelenmiştir.

Ayrıca bu çalışmada ETD-ARP ve DARP ile ilgili detaylı bir kaynak taraması yapılmıştır. DETD ARP'nin tanımı yapılmış ve önerilen matematiksel model sunulmuştur. Modelle ilgili sayısal analizler yapılmış ve matematiksel modelin etkinliği değerlendirilmiştir. İlk aşamada literatürde yer alan bir matematiksel model kullanılarak ilk çözüm elde edilmiştir. Daha sonra geliştirilen matematiksel modelin etkinliğini test etmek için bir senaryo geliştirilmiş ve geliştirilen senaryoya göre bir yeniden rotalama zamanı belirlenmiştir. Yeniden rotalama zamanında gelen dinamik talepler de sisteme dâhil edilerek geliştirilen yeni matematiksel model ile çözülmüştür. Daha sonra önerilen Rassal İteratif Yerel Arama Değişken Komşu İniş (R-İYA-DKİ) algoritmasıyla problem çözülmüş ve önerilen sezgisel algoritmanın performansı değerlendirilmiştir. Son bölümde orta ve büyük boyutlu problemler R-İYA-DKİ algoritmasıyla çözülmüş ve genel bir değerlendirme yapılarak sonuçlar tartışılmıştır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI (LITERATURE SURVEY)

Bu çalışma kapsamında ele alınan ARP türlerinden ETD ARP ve DARP ile ilgili literatür araştırması yapılarak ayrı ayrı bölümler halinde sunulmuştur.

### 2.1. Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem With Simultaneous Pickup And Delivery)

Topla Dağıt Araç Rotalama Probleminde (TD ARP) müşteri taleplerinin dağıtılması ve müşterilerden alınarak depoya getirilecek ürünlerin toplanması olmak üzere iki farklı taşıma ve hizmet söz konusudur. Bu bağlamda depodan çıkan araç/araçların müşteri dağıtım taleplerini karşılarken aynı zamanda müşterilerden alınarak depoya götürülecek olan ürünleri de toplaması gerekmektedir. TD ARP'de aracın üzerindeki yük yol boyunca dalgalı bir seyir izlemektedir. Bu yüzden TD ARP'lerde araçları rotalamak klasik ARP'ye göre daha zordur. Bu problem türünde planlama iyi bir şekilde yapılamazsa araç kapasiteleri atıl kalır, kat edilen toplam mesafe artarken daha fazla araca da ihtiyaç duyulabilir [8]. Literatürde TD ARP'nin, Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi (ÖDST ARP), Karma Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (KTD ARP) ve Eşzamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (ETD ARP) olmak üzere üç farklı türü bulunmaktadır. ÖDST ARP ve KTD ARP'de müşteriler ya toplama ya da dağıtım müşterisi olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen ETD ARP'de ise bir müşteri aynı anda hem toplama hem de dağıtım müşterisi olabilmektedir [9]. Berbeglia vd. [10], ile Parragh vd. [11, 12] ETD ARP ve varyasyonları ile ilgili çalışmaları detaylı olarak incelemişlerdir. ETD ARP ile ilgili olarak yapılan diğer çalışmalar Tablo 1'de gösterilmiştir.

### 2.2. Dinamik Araç Rotalama Problemi (Dynamic Vehicle Routing Problem)

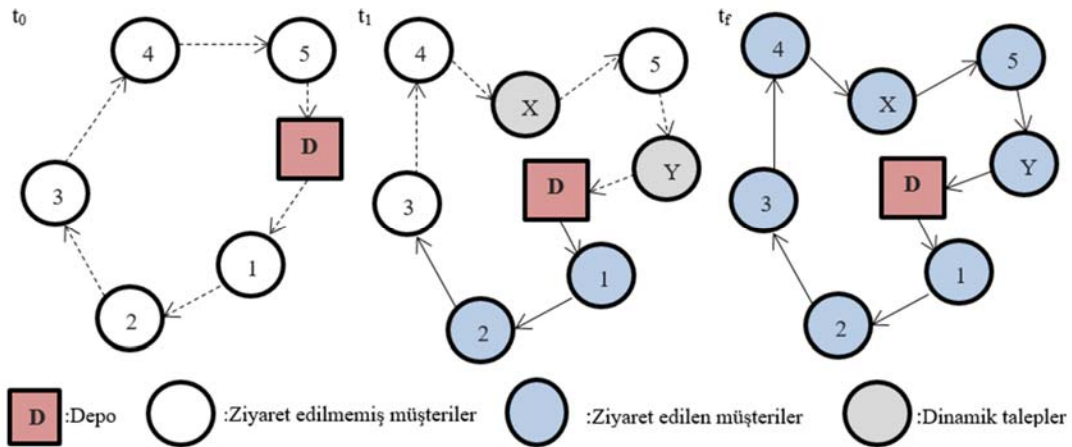
Dinamik araç rotalama problemi (DARP), müşteri taleplerinin her zaman etkin bir şekilde karşılanabilmesini amaçlar. DARP'de klasik ARP'den farklı olarak; herhangi bir t anında gelebilecek müşteri talebinin sisteme dahil edilerek dolaşımda bulunan araçlar tarafından karşılanması amaçlanır (Şekil 1). DARP'de gelen/gelebilecek müşteri talepleri senaryolar ya da anlık gerçek bilgiler yardımıyla tespit edilerek en kısa sürede karşılanır. Klasik ARP ile DARP arasındaki en temel fark, ARP'de girdi verileri sabitken DARP'de zaman içerisinde girdi verileri sürekli olarak değişebilmektedir [55].

DARP'de çözüm yaklaşımları periyodik yeniden eniyileme ve sürekli yeniden eniyileme süreci olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır [56]. Sürekli ve periyodik yeniden eniyileme yaklaşımlarında güne rotaların ilk setinden oluşan bir eniyi çözüm ile başlanır. Periyodik yeniden eniyilemede gün içerisinde müşterilerden gelen yeni talepler belli aralıklarla sisteme dâhil edilerek problem statik bir problemmiş gibi çözülür. Sürekli yeniden eniyileme yaklaşımında ise gün içerisinde gelen her yeni müşteri talebi sisteme anlık olarak dâhil edilerek uyarlanabilir hafıza yardımıyla problem çözülür [57]. Bu çalışma kapsamında periyodik eniyileme süreci çözüm yaklaşımı olarak kullanılmıştır. Periyodik yeniden eniyileme yaklaşımına ilişkin süreç Şekil 2'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** ETD\_ ARP ile ilgili olarak yapılan çalışmalar (Literature review for VRPSPD)

YIL	YAZAR	PROBLEM	ÇÖZÜM YAKLAŞIMI
1989	Min [13]	Halk kütüphanesinde kitap dağıtımı	Önce grupla sonra dağıt prensibine dayalı sezgisel algoritma
1992	Halse [14]	ETD_ ARP	Önce grupla sonra dağıt prensibine dayalı sezgisel algoritma
1999	Salhi ve Nagy [15]	ETD_ ARP, Çok depolu	Ekleme(insert) yöntemine dayalı bir sezgisel algoritma
2001	Dethloff [16]	ETD_ ARP	Matematiksel model ve sezgisel algoritma
2002	Tang ve Galvao [17]	ETD_ ARP	Klasik ARP için geliştirilen büyük tur parçalama ve süpürme (sweep) algoritmaları
2005	Nagy ve Salhi [18]	ETD_ ARP	Matematiksel model ve ekleme (insert) tabanlı bir sezgisel
2005	Crispim ve Brandao [19]	ETD_ ARP	Değişken komşu iniş (Variable neighborhood descent) algoritması ile tabu aramayı birleştiren karma bir metasezgisel
2006	Dell' Amico vd. [20]	ETD_ ARP	Dal- fiyatlandırma algoritması
2006	Ropke ve Pisinger [9]	ETD-ARP ve farklı ARP türleri	Büyük komşuluk arama (large neighborhood search) sezgiseli
2006	Chen [21]	ETD_ ARP	Tavlama benzetimi ile değişken komşu iniş (Variable neighborhood descent) algoritmasını birleştiren karma bir metasezgisel
2006	Chen ve Wu [22]	ETD_ ARP	Kayıttan-kayıta seyahat (Record-to-record travel) algoritması
2006	Montane ve Galvao [23]	ETD_ ARP	Karma tam sayılı matematiksel model ve dört farklı komşuluk yapısı ile uzun dönemli hafıza mekanizması kullanan bir tabu arama algoritması
2007	Gencer ve Yaşa [24]	ETD_ ARP	Matematiksel model ve karar destek sistemi yazılımı
2007	Wassan vd. [25]	ETD_ ARP	Üç farklı hareket mekanizmasının oluşturduğu komşuluk yapılarını kullanan tepkisel (reactive) bir tabu arama algoritması
2009	Bianchessi ve Righini [26]	ETD_ ARP	Tabu arama algoritması, farklı çözüm kurucu sezgiseller, yerel arama algoritmaları ve değişken komşuluk yapıları
2009a	Zachariadis vd. [27]	ETD_ ARP	Tabu arama ile özel bir yerel arama algoritmasını birleştiren karma bir sezgisel yaklaşım
2009b	Zachariadis vd. [28]	ETD_ ARP	Uyarlamalı hafıza metodolojisi ve tabu arama algoritmasına dayalı başka bir karma sezgisel
2009	Ai ve Kachitvichyanukul [29]	ETD_ ARP	Kuş sürüşü eniyileme algoritması
2009	Gajpal ve Abad [30]	ETD_ ARP	Karınca kolonisi eniyileme algoritması
2010	Çetin ve Gencer [31]	Sıkı zaman pencere ETD_ ARP	Matematiksel model
2010	Subramanian vd. [32]	ETD_ ARP	İteratif olarak yerel arama yapan ve arama sırasında rassal olarak komşuluk yapısını değiştiren bir paralel sezgisel
2010	Mingyong ve Erbao [33]	Zaman pencere ETD_ ARP	Karma tam sayılı matematiksel model, Diferansiyel evrim algoritması
2011	Subramanian vd. [34]	ETD_ ARP	Dal-kesme(Branch-and-cut) algoritması
2011	Zachariadis ve Kiranoudis [35]	ETD_ ARP	Yerel arama tabanlı bir sezgisel
2012	Tasan ve Gen [36]	ETD_ ARP	Detloff'un geliştirdiği matematiksel model ve genetik algoritma
2012	Wang ve Chen [37]	Zaman pencere ETD_ ARP	Eş evrimli genetik algoritma
2012	Cruz vd. [38]	ETD_ ARP	GENVNS-TS-CL-PR adında bir sezgisel algoritma
2012	Zhang vd. [39]	ETD_ ARP	ÇÖZÜM YAKLAŞIMI Dağılım arama (scatter search) yaklaşımı
2013	Goksal vd. [40]	ETD_ ARP	Kuş sürüşü eniyileme algoritması
2013	Hezer ve Kara [41]	ETD_ ARP	Bakteriyel besin arama optimizasyonu
2013	Liu vd. [42]	Evde hasta bakımı için ETD_ ARP	İki farklı karışık tam sayılı matematiksel model önermişlerdir. Çözüm için genetik algoritma ve tabu arama algoritmalarını kullanmışlardır.
2015	Avcı ve Topaloğlu [43]	ETD_ ARP ve karışık ETD_ ARP	Tavlama benzetimi

2015	Gschwind [44]	Seyahat süresi ETD_ ARP	kısıtlı Sütun üretme tekniğini temel alan dört farklı dal-kesme algoritması
2015	Keçeci, Altıparmak ve Kara [45]	Heterojen ETD_ ARP	Ayrıntı tabanlı bir matematiksel model ve Clarke ve Wright sezgiseli
2015	Wang vd. [46]	ETD_ ARP	Paralel tavlama benzetimi
2015	Li vd. [47]	ETD_ ARP ve çok depolu ETD_ ARP	İteratif yerel arama temelli bir sezgisel algoritma
2016	Zachariadis vd. [48]	İki boyutlu yükleme ETD_ ARP	kısıtlı Yerel Arama (YA) algoritması
2016	Kalayci ve Kaya [49]	ETD_ ARP	Karınca kolonisi algoritması
2017	Iassinovskaia vd. [50]	Zaman pencere ETD_ ARP	Küçük boyutlu problemler için karışık tam sayılı bir matematiksel model Büyük boyutlu problemler için önce kümele – sonra rotala sezgiseli
2017	Bayrak ve Özyörük [51]	Bölünmüş talepli ETD_ ARP	Küçük boyutlu problemlerin çözümü için iki farklı matematiksel model önermişlerdir.
2018	Zhu ve Sheu [52]	Stokastik talepli ETD_ ARP	Adaptif büyük değişken komşu arama algoritması.
2018	Belgin, Karaoglan ve Altıparmak [53]	İki kademeli ETD_ ARP	Değişken komşu iniş ve yerel arama algoritması.
2019	Zhang, Cheang, Li ve Lim [54]	Hazır giyim sektöründe çok ürünlü ETD_ ARP	Bölüm temelli bir Adaptif hafıza programlama.



Şekil 1. Dinamik araç rotalama örneği (Sample of dynamic vehicle routing problem) [56].

DARP'de müşterilerden  $t$  zamanında gelecek dinamik taleplerin sıklığı problemin çözümünü önemli derecede etkilemektedir. Sistemin dinamikliğini ölçmek için literatürde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılması Lund vd. [58] tarafından geliştirilen denklemdir (Eş. 1).

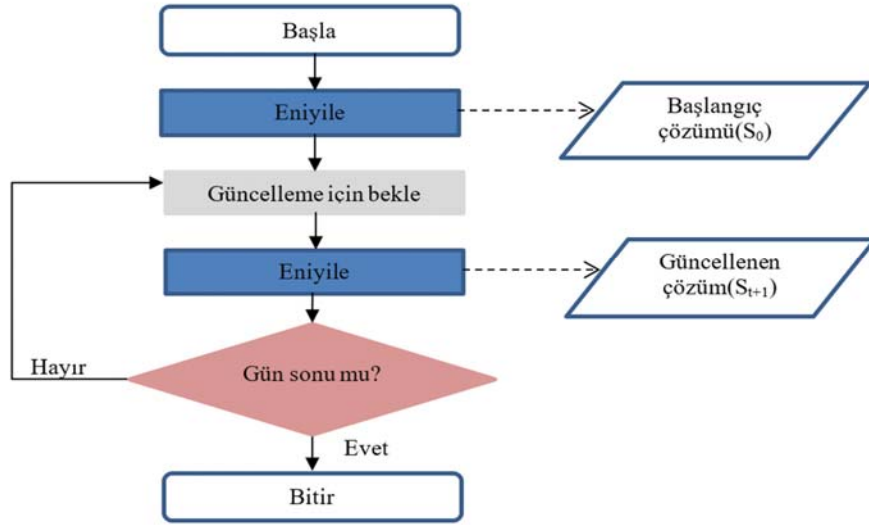
$$DD = \frac{n_d}{n_{top}} * 100 \quad (1)$$

Bu denklemde  $n_d$  dinamik olarak gelen talepleri,  $n_{top}$  ise toplam talebi ifade etmektedir. Çalışma kapsamında Dinamiklik Derecesi (DD) hesaplanırken yukarıda bahsedilen denklemden yararlanılmıştır.

Literatürde DARP ile ilgili olarak birçok çalışmanın yapıldığı, ancak dinamik ETD-ARP ile ilgili bir çalışmanın olmadığı, genellikle yapılan çalışmaların önce topla sonra

dağıt şeklinde olduğu görülmektedir. DARP ile ilgili olarak yapılan çalışmalar Tablo 2'de gösterilmiştir.

Literatüre bakıldığında ETD\_ ARP ve DARP ile ilgili birçok çalışmanın olduğu görülmektedir. Ulaşılabilen kaynaklar incelendiğinde, DARP ile ilgili olarak yapılan çalışmaların genellikle dinamik talep, zaman penceresi, müşteri memnuniyeti, heterojen araç kapasitesi, filo yönetimi, araç arızalanması, trafik yoğunluğu, ürünün kırılması, müşterinin yerinin dinamik olarak değişmesi gibi konularda olduğu görülmektedir [81]. Topla-dağıt ARP ile ilgili olarak ise dinamik Karma TD\_ ARP türleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Yani sadece müşterilerin ya dağıtım ya da toplama müşterisi olduğu durum incelenmiştir. Özellikle ürünün bir müşteriden alınarak diğere teslim edilmesini içeren, ürünün belli bir noktadan alınarak belli bir noktaya teslim edildiği dinamik TD\_ ARP'ler ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Ancak direkt olarak DETD\_ ARP ile ilgili bir çalışmanın yapılmadığı görülmüştür.



Şekil 2. Periyodik eniyileme süreci (Periodic re-optimization process) [56].

Tablo 2. DARP ile ilgili olarak yapılan çalışmalar (Literature review for DVRP)

YIL	YAZAR	PROBLEM	ÇÖZÜM YAKLAŞIMI
2004	Bent ve Hentenryck [59]	Stokastik DARP	Çoklu senaryo yaklaşımı
2005	Du vd. [60]	Elektronik ticarete DARP	Benzeetim ve en yakın komşu arama algoritması
2005	Montemannni vd. [61]	DARP	Karınca kolonisi algoritması
2005	Haghani ve Jung [62]	Seyahat süresi kısıtlı DARP	Matematiksel model ve genetik algoritma
2007	Hanshar ve Ombuki-Berman [63]	DARP	Genetik algoritma
2008	Cheung vd. [64]	Dinamik filo yönetimli DARP	Matematiksel model İki aşamalı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. İlk aşamada süpürme algoritmasını, ikinci aşamada ise tabu arama algoritmasını kullanmışlardır.
2011	Liao ve Hu [65]	DARP	Olay güdümlü bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir.
2012	Pillac vd. [66]	DARP	Araçların gün içerisinde birden fazla rota üzerinde seyahat ettiği DARP
2012	Azi vd. [67]	Değişken komşu arama algoritması.	
2013	Ferrucci vd. [68]	Acil teslimatlı DARP	Gerçek zaman kontrollü bir çözüm yaklaşımı
2014	Xu vd. [69]	Zaman pencereci DARP	Değişken komşu arama
2014	Ghannadpour vd. [70]	Bulanık zaman pencereci ve çok amaçlı DARP	Genetik algoritma
2015	Mavrovouniotis ve Yang [71]	DARP	Karınca kolonisi algoritması ve göçmen şeması
2015	Euchi vd. [72]	Topla-dağıt DARP	2-opt operatörünü kullanan yapay karınca kolonisi algoritması
2015	Schyns [73]	Heterojen kapasiteli, zaman pencereleri ve bölünmüş teslimat	Karınca kolonisi algoritması
2015	Barkaoui, Berger ve Boukhtouta [74]	Müşterilerin birden fazla kez ziyaret edilmesi	Genetik algoritma
2016	Kuo, Wibowo ve Zulvia [75]	Kesin olmayan servis zamanı	Karınca kolonisi algoritması
2017	AbdAllah, Essam ve Sarker [76]	DARP	Eşit ağırlıklandırılmış uyumluluk fonksiyonuna sahip bir GA
2018	Chen ve ark.[77]	Sınırlı araç ve sıkı zaman pencereci	Adaptif büyük değişken komşu arama algoritması.
2018	Ulmer, Soeffker ve Mattfeld [78]	Çok periyotlu stokastik talepli dinamik araç rotalama	Beklenti politikasına dayalı çevrimdışı değer fonksiyonu yaklaşımı
2019	Nasser vd. [79]	Trafik durumun dikkate alan DARP	Kendinden uyarlamalı evrimsel algoritma
2019	Okulewicz ve Mańdziuk [80]	DARP	Kuş sürüsü algoritması, Genetik algoritma



### 3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

#### (PROBLEM DEFINITION AND MATHEMATICAL FORMULATION)

Günlük hayatta firmalara sürekli olarak müşteri talepleri gelmekte ve bu taleplerin kısa sürede karşılanması müşteri memnuniyeti açısından büyük önem arz etmektedir. Firmaların gerek araç sayısı gerekse de taşıma maliyetleri açısından bu süreci eniyi şekilde yönetebilmeleri için dolaşımda bulunan araçların kullanılması firmalara büyük avantajlar sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamında da firmalara gelen toplama taleplerinin dolaşımda bulunan araçlar tarafından karşılanması durumunu ele alan ayrıt tabanlı bir matematiksel model ele alınmıştır. Ayrıt tabanlı bir model geliştirilmesinin sebebi daha önce Karaoğlan [82] ve Keçeci [83] tarafından geliştirilen düğüm ve ayrıt tabanlı modellerin karşılaştırılmasında ayrıt tabanlı modellerin çözüm süresi ve eniyi çözüme ulaşan problem sayısı (EÇUPS) açısından daha iyi sonuçlar vermesidir. Karaoğlan [82] tarafından ETD\_ARP için geliştirilen model ile Keçeci [83] tarafından heterojen ETD\_ARP için geliştirilen model birlikte ele alınmış ve bu modellerde yer alan kısıtlara dolaşımda olan araçları içeren yeni kısıtlar eklenerek yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Geliştirilen matematiksel model günün herhangi bir  $t$  anında gelen müşteri taleplerini (dağıtım ve toplama) sisteme dâhil ederek, minimum maliyetli rotaların bulunmasını sağlamaktadır. Matematiksel model  $t$  anında müşterilerden gelen yeni dağıtım ve toplama taleplerinin rotalanmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak müşterilerden gelen dağıtım ve toplama taleplerinin birlikte ele alınması durumunda, yeni gelen dağıtım taleplerinden dolayı muhakkak depodan yeni bir aracın çıkması gerekecektir. Çünkü  $t$  anında araçların üzerindeki dağıtılacak yük miktarları bellidir ve araçlar depoda olmadığı için bu araçlara yeni dağıtım talepleri ile ilgili bir yükleme yapılması mümkün olmayacaktır. Bu yüzden çalışma kapsamında ilk rotalamada ( $t_0$  anında) müşterilerden gelen dağıtım ve toplama talepleri birlikte dikkate alınırken herhangi bir  $t$  anında yapılacak periyodik yeniden eniyileme sürecinde ise sadece müşterilerden gelen toplama talepleri ile dolaşımda bulunan araçların henüz ziyaret edemediği müşterilerin dağıtım ve toplama talepleri birlikte dikkate alınmıştır.

$t$  anında yapılacak olan periyodik yeniden eniyileme sürecinde; dolaşımda olan araçların yük ve konum bilgileri ile  $t$  anında henüz ziyaret edilmemiş olan müşterilerin dağıtım ve toplama talepleri girdi olarak kullanılmaktadır. Bu açıdan bakıldığında;  $t$  anında yeniden rotalamayı yapabilmek için  $t-1$  aşamasında elde edilen çözüme ihtiyaç duyulmaktadır. Yukarıda bahsedilen nedenlerden ve periyodik yeniden eniyileme yaklaşımının doğası gereği DETD\_ARP'nin tüm  $t$  aşamalarını kapsayacak şekilde modellenmesi mümkün değildir. Çünkü her  $t$  periyodik yeniden eniyileme dönemi kendisinden bir önceki  $t-1$  döneminde elde edilen çözüme ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden DETD\_ARP'nin  $t$  anında çözülebilmesi için statik

bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modelin Karaoğlan [82] ve Keçeci [83] tarafından geliştirilen matematiksel modelden farkı, dolaşımda bulunan araçların mevcut konum ve yük bilgilerine ait kısıtları içermesidir. Araçlara ilişkin bilgileri matematiksel modele aktarmak için Eş. 11, Eş. 12, Eş. 16, Eş. 17, Eş. 18, Eş. 19 kısıtları kullanılmıştır.

Genel olarak, TD\_ARP'yi şu şekilde tanımlayabiliriz:  $G(N,A)$  tüm düğümleri arasında bağlantısı olan bir serim olsun. Burada  $N$  düğümlerin kümesini,  $A = \{(i,j); i \neq j, i,j \in N\}$ 'da düğümler arasındaki ayrıtların kümesini göstermektedir.  $N$ 'de yer alan ilk düğüm (0 düğümü) depoyu gösterirken, diğer düğümler ise müşterileri göstermektedir.  $(i,j)$  ayrıtının uzunluğu  $c_{ij}$  ile gösterilmekte ve tüm ayrıtlar için üçgensel eşitsizlik ( $c_{ij} \leq c_{ik} + c_{kj}$ ) sağlanmaktadır. Kullanılan araçların kapasiteleri aynı ve tüm araçlar depoda hazırdır. Bu problemdeki amaç yukarıda yapılan tanımlamaya göre en küçük maliyetli rotaların belirlenmesidir [82].

#### Varsayımlar:

- İlk rotalamada hem dağıtım hem de toplama talepleri dikkate alınacaktır. Gün içerisinde yapılacak diğer rotalamalarda ise henüz ziyaret edilmemiş müşterilerin dağıtım ve toplama talepleri ile yeni gelen toplama talepleri dikkate alınacaktır.
- Araçlar eşit kapasiteye sahiptir.
- İlk rotalamada araçların başlangıç noktaları depodur. Daha sonra yapılacak rotalamalarda ise dolaşımda olan araçların başlangıç noktaları en son uğradıkları düğümün koordinatlarına sahip yapay düğümler olarak kabul edilecektir. Araçların bu düğümü geçtikten sonra gittikleri mesafe dikkate alınmayacaktır.
- Dolaşımdaki araçların yeni gelen toplama taleplerini karşılayamamaları durumunda depodan yeni bir araç çıkacaktır.
- Başlangıç rotası da dâhil olmak üzere tüm rotaların bitiş noktası depo olacaktır.
- Müşterilere gün içerisinde sadece bir kez uğranabilecektir. Müşteriye uğradıktan sonra, müşteriden gelen talepler bir sonraki günün planlanmasında değerlendirilecektir.
- Dolaşımda olan araçların üzerindeki toplanan ve dağıtılacak yüklerin toplamı araç kapasitesini geçmemelidir.

#### Kümeler:

- $N_s$  : Araçların başlangıç noktaları  
 $N_c$  : Müşterilerin kümesi  
 $N$  : Tüm müşterilerden, depodan ve araçların başlangıç noktalarından oluşan küme  $\{N_s \cup N_c \cup 0\}$

#### Parametreler:

- $Q$  : Araç kapasitesi  
 $c_{ij}$  : Düğümler arasındaki uzaklık,  $i,j \in N, i \neq j$

- $d_j$  : Müşterilere yapılacak olan teslimat miktarları,  $j \in N_c$   $z_{i0} = 0 \quad i \in N/\{0\}$  (10)  
 $p_j$  : Müşterilerden toplanacak miktar,  $j \in N_c$   $z_{0j} = A_j \quad j \in N_s$  (11)  
 $A_i$  :  $i$  başlangıç noktasındaki aracın üzerindeki dağıtılacak ürün miktarı,  $i \in N_s$   $z_{ij} = 0 \quad j \in N_s, i \neq j$  (12)  
 $B_i$  :  $i$  başlangıç noktasındaki aracın üzerindeki toplanan ürün miktarı,  $i \in N_s$   
 $M$  : Depodaki araç sayısı

**Karar Değişkenleri:**

- $z_{ij}$  :  $(i,j)$  ayrıtı bir aracın turu üzerinde ise, bu araç  $j$ 'inci düğüme gelene kadar ( $j$  düğümü hariç) araçta kalan dağıtılacak yük miktarını gösterir yardımcı karar değişkeni.  $(i,j)$  ayrıtı herhangi bir aracın turu üzerinde değil ise 0 değerini alır ( $i,j \in N$ ).  $\sum_{i \in N} t_{ji} - \sum_{i \in N} t_{ij} = p_j \quad j \in N/\{0\}$  (13)  
 $t_{ij}$  :  $(i,j)$  ayrıtı bir aracın turu üzerinde ise, bu araç  $j$ 'inci düğüme gelene kadar ( $j$  düğümü hariç) toplanan yük miktarını gösterir yardımcı karar değişkeni.  $(i,j)$  ayrıtı herhangi bir aracın turu üzerinde değil ise 0 değerini alır ( $i,j \in N$ ).  $p_i x_{ij} \leq t_{ij} \leq (Q - p_j) x_{ij} \quad i,j \in N, i \neq j$  (14)  
 $x_{ij}$  :  $(i,j)$  ayrıtı tura dâhilse 1, değilse 0 değerini alan karar değişkeni.  $t_{0j} = 0 \quad j \in N_c$  (15)  
 $t_{0j} = B_j \quad j \in N_s$  (16)  
 $t_{ij} = 0 \quad j \in N_s, i \neq j$  (17)  
 $x_{0j} = 1 \quad j \in N_s$  (18)

**Amaç Fonksiyonu:**

$$\text{Enk } Z = \sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

$$x_{ij} = 0 \quad i,j \in N_s, i \neq j \quad (19)$$

$$M \geq 0 \quad (20)$$

**Kısıtlar:**

$$\sum_{j \in N/\{0\}} x_{0j} \leq M \quad (3)$$

$$z_{ij}, t_{ij} \geq 0 \quad i,j \in N, i \neq j \quad (21)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad i,j \in N, i \neq j \quad (22)$$

$$\sum_{i \in N/\{0\}} x_{i0} \leq M \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1 \quad j \in N/\{0\}, i \neq j \quad (5a)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad i \in N/\{0\}, i \neq j \quad (5b)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = \sum_{j \in N} x_{ji} \quad i \in N/\{0\}, i \neq j \quad (6)$$

$$z_{ij} + t_{ij} \leq Q x_{ij} \quad i,j \in N, i \neq j \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N} z_{ij} - \sum_{i \in N} z_{ji} = d_j \quad j \in N/\{0\} \quad (8)$$

$$d_j x_{ij} \leq z_{ij} \leq (Q - d_i) x_{ij} \quad i,j \in N, i \neq j \quad (9)$$

Bu ayrıt tabanlı modelde (ATM), Eş. 2 amaç fonksiyonunu göstermektedir. Amaç fonksiyonu taşıma maliyetleri toplamını en küçüklemektedir. Eş. 3 ve Eş. 4 numaralı kısıtlar sırasıyla depodan en fazla  $M$  aracın ayrılmasını ve depoya  $M$  aracın dönmesini sağlar. Eş. 5a ve Eş. 5b numaralı kısıtlar herhangi bir düğüme yalnızca bir düğümden gelinmesini sağlar. Eş. 6 numaralı kısıt turda devamlılığı sağlar. Eş. 7 numaralı kısıt herhangi bir ayrıt üzerinde araç kapasitesinin aşılmasını engeller. Eş. 8 numaralı kısıt aracın dağıtım yükünün araç turda ilerlerken azalan şekilde seyretmesini sağlarken, Eş. 9 numaralı kısıt aracın dağıtım yükü için alt ve üst sınır değerlerini belirler. Eş. 9 aracın  $j$  düğümüne gelmeden önce üzerinde en az  $j$  düğümünün dağıtım talebi kadar yük olmasını sağlamaktadır. Eş. 10 numaralı kısıt aracın dağıtım yükünü tur sonunda sıfıra eşitler. Eş. 11 numaralı kısıt dolaşımda olan araçların üzerinde bulunan dağıtılacak ürün miktarını belirlerken, Eş. 12 numaralı kısıt dolaşımda olan araçların başlangıç noktaları arasındaki akışları engeller. Eş. 13 numaralı kısıt aracın topladığı yükün araç turda ilerlerken artan şekilde seyretmesini sağlarken, Eş. 14 numaralı kısıt aracın topladığı yük için alt ve üst sınır değerlerini belirler. Eş. 14 numaralı kısıt da aracın  $j$  düğümüne gelmeden önce üzerinde en az  $j$  düğümünün toplama talebini gelecek kadar kapasite olmasını sağlamaktadır. Yine buradaki alt sınır değeri de Eş. 9'daki



üst sınır gibi çözüm süresini kısaltmaktadır. Eş. 8 ve Eş. 9 numaralı kısıtlar azalan; Eş. 13 ve Eş. 14 numaralı kısıtlar ise artan basamak fonksiyon yapısı göstererek çalışırlar. Eş. 8 ve Eş. 13 numaralı kısıtlar alt turların oluşmasını engeller. Eğer  $(i, j)$  ayrıtı herhangi tur üzerinde değil ise, Eş. 9 ve Eş. 14 numaralı kısıtlar sırasıyla dağıtım ve toplama yükünü gösteren yardımcı değişkenlerin sıfır değerini almasını sağlar. Eş. 15 numaralı kısıt depodan direkt olarak müşterilere giden araçlar üzerinde bulunan toplanan yük miktarını sıfıra eşitler. Eş. 16 numaralı kısıt dolaşımda olan araçların üzerinde bulunan toplanan yük miktarı göstermektedir. Eş. 17 numaralı kısıt dolaşımda olan araçların başlangıç noktaları arasındaki akışları engeller. Eş. 18 numaralı kısıt dolaşımda olan araçların bulunduğu düğümünden mutlaka bir aracın çıkmasını sağlar. Eş. 19 numaralı kısıt dolaşımda olan araçların başlangıç noktaları arasındaki akışları engeller. Son olarak Eş. 20, Eş. 21 ve Eş. 22 numaralı kısıtlar ise işaret kısıtlarıdır.

#### 4. SEZGİSEL ALGORİTMA (HEURISTIC ALGORITHM)

DETD\_ARN'in amacı müşterilerden gelen dinamik toplama taleplerinin dolaşımda bulunan araçlar tarafından karşılanmasıdır. Bu yüzden yeniden rotalamanın yapılacağı anda, dolaşımda bulunan araçlara ait yeni rotaların çok hızlı bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

ETD\_ARN ve DETD\_ARN, NP-zor yapıda bir problem olduğu için eniyi çözüme ulaşmak çok uzun zaman alabilmektedir. Yine ARN'de kısıt sayısının artması problemin karmaşıklığını arttırmakta ve problemin eniyi çözüme ulaşmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle literatürde ARN'nin çözümünde genellikle eniyi çözüme yakın değerler veren ve kısa sürede çözüm sağlayan sezgisel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır [84].

DETD\_ARN'de yeni rotaların en kısa sürede belirlenebilmesi son derece önemlidir. Bu yüzden bu çalışma kapsamında sezgisel algoritmalarından yararlanılmıştır. Subramanian, Ochi ve Cabral'ın [85] ve Penna, Subramanian ve Ochi'nin [86] çalışmaları ele alınarak R – İYA – DKİ (Rassal - İteratif Yerel Arama - Değişken Komşu İniş) algoritması adında yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algoritmada diğer algoritmalarından farklı olarak üst (hyper) sezgisellerden yararlanılmış, rassal DKİ algoritmasıyla beraber, İYA'da komşuluk yapılarının uygulanmasında rastgele permütasyon seçim algoritması kullanılmış ve komşuluk sırası rassal olarak değiştirilmiştir.

Başlangıç çözümünün oluşturulması için ise En Yakın Komşu (EYK) algoritması kullanılmıştır. EYK algoritmasında depodan başlayarak, depoya en yakın düğüm ( $j$  düğümü) rotaya eklenir. Daha sonra  $j$  düğümüne en yakın  $j+1$ 'inci düğüm rotaya eklenir. Araç kapasiteleri ve varsa problemle ilgili diğer kısıtlar dikkate alınarak tüm müşteriler bir rotaya eklenir. Sezgisel yaklaşımlarda mevcut çözümün komşu çözümlerini araştırmak için kullanılan hareket mekanizmaları son derece önemlidir. Bu bağlamda çalışma kapsamında 7 turlar arası ve 5 tur içi olmak üzere 12 farklı

hareket mekanizması kullanılmıştır. Tur içi hareket mekanizması olarak; Potvin ve Rousseau [87] tarafından önerilen Or-opt ve 2-opt ile Nagi ve Salhi [88] tarafından önerilen tur içi yer değiştirme (exchange) ve ters çevirme ile ekleme (insert) operatörleri kullanılmıştır.

Turlar arası hareket mekanizmalarından en önemlileri  $\lambda$ -yer değiştirme esasına dayalı olan operatörlerdir.  $\lambda$ -yer değiştirme, ilk olarak Osman ve Christofides [89] tarafından kapasiteli küme kaplama probleminde kullanılmıştır.  $\lambda$ -yer değiştirmede  $(\lambda_1, \lambda_2)$ , R1 rotasından  $\lambda_1$  kadar müşteri alınıp R2 rotasına, R2 rotasından  $\lambda_2$  kadar müşteri alınıp R1 rotasına eklenmektedir.

Subramanian, Drummond, Bentes, Ochi ve Farias [90] tarafından  $\lambda$  değerinin 2 olarak alındığı görülmüştür. Bu yaklaşıma göre rastgele seçilen iki rota için, her bir rotadan en fazla 2 müşteri alınarak diğer rotaya eklenecektir. Tan, Lee, Zhu ve Ou [91],  $\lambda=2$  olarak yer değiştirme operatörlerini  $(0,1)$ ,  $(1,0)$ ,  $(1,1)$   $(2,0)$ ,  $(0,2)$ ,  $(2,1)$ ,  $(1,2)$ ,  $(2,2)$  olarak belirlemişlerdir. Bu çalışmada  $\lambda$ -yer değiştirme hareketinin uygulanacağı rotalar rastgele seçildiği için  $(0,1)$ ,  $(1,1)$   $(2,0)$ ,  $(2,1)$  ve  $(2,2)$   $\lambda$ -yer değiştirme operatörleri kullanılmıştır. Yine çalışma kapsamında turlar arası hareket mekanizması olarak Subramanian, Penna, Uchoa ve Ochi [92] tarafından önerilen k-kaydırma ile Taillard, Badeau, Gendreau, Guertin ve Potvin [93] tarafından önerilen çaprazlama operatörleri de kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında turların yeniden sıralanması ve tamiri için Nagi ve Salhi [88] tarafından önerilen basit bir sezgisel yaklaşımdan faydalanılmıştır. Bu sezgisel yaklaşımda iki farklı tamir mekanizması kullanılmıştır. Bunlardan ilki uygun olmayan turun tersten sıralanmasıdır. ETD\_ARN problemlerinde yükün dalgalı bir seyir izlemesi nedeniyle turun tersten sıralanması, yükteki dalgalanmadan dolayı araç kapasitesinin aşılmasını engelleyebilir. Tur tersten sıralandığında da araç kapasitesinin aşıldığı durumlarda önerilen ikinci yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşıma göre başlangıç düğümünden çıkılarak, başlangıç düğümüne en yakın olan ve araç kapasitesini aşmayan  $j$  müşterisi tura dâhil edilir. Daha sonra yine  $j$  müşterisine en yakın olan ve araç kapasitesini aşmayan  $j+1$ 'inci müşteri tura eklenir. Bütün müşterilere tura eklenene kadar devam edilir.

#### 5. SAYISAL ANALİZLER (COMPUTATIONAL ANALYSIS)

Bu bölümde DETD\_ARN için önerilen iki aşamalı yaklaşımın performansı değerlendirilmiştir. İlk aşamada literatürde yer alan Karaoğlan [65] ve Keçeci [66] tarafından geliştirilen ayrıt tabanlı model kullanılırken, ikinci aşamada çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel model kullanılmıştır. İki model de GAMS programında kodlanmış ve modelleri çözmek için CPLEX 12.6 kullanılmıştır. Koşumlar Intel® Core™ i5-3337U 1.8Ghz hızında 4 GB ara belleğe sahip, "Windows 8.1 Pro" işletim sistemi ile çalışan bir bilgisayarda yapılmıştır. Bütün koşumlar 2 saat ( $2*60*60=7200$  saniye) ile sınırlanmıştır.

Adım 1: Başlangıç çözümünü oluştur (S)

Durdurma koşulunu belirle

$N_i = \{ \text{Or-opt, 2-opt, Insert, Turiçi Yer Değiştirme, Ters Çevirme} \}$

$N_k = \{ (1,0), (1,1), (2,0), (2,1), (2,2), \text{Çaprazlama, k-kaydırma} \}$

Adım 2: R - İYA-DKİ algoritmasıyla çözümü iyileştir.

Adım 2.1:  $N_k$  komşuluk yapıları kümesinden rastgele bir komşuluk yapısını seç,  $k_r$

Adım 2.2:  $k_r$  komşuluk yapısıyla S'den S' çözümünü üret.

Adım 2.2.1: Turların uygunluğunu kontrol et.

Turlar uygunsa Adım 2.2.2'ye git.

Turlar uygun değilse tamir mekanizmasını kullanarak turları tamir et.

Tamir mekanizmasıyla turlar uygun hale getirildiyse Adım 2.2.2'ye git.

Değilse  $k_r$ 'yi  $N_k$  komşuluk kümesinden çıkar ve Adım 3'e git.

Adım 2.2.2: Eğer  $f(S') < f(S)$  ise  $S \leftarrow S'$  olarak belirle.

Değilse Adım 3'e git.

Adım 2.3:  $N_i$  kümesindeki sıralamayı rastgele azalan permütasyon yöntemi ile değiştir ve sırasıyla:

S çözümüne  $N_i(1)$  komşuluk yapısını uygula ve S' çözümünü elde et.

S' çözümüne  $N_i(2)$  komşuluk yapısını uygula ve S'' çözümünü elde et.

S'' çözümüne  $N_i(3)$  komşuluk yapısını uygula ve S''' çözümünü elde et.

S''' çözümüne  $N_i(4)$  komşuluk yapısını uygula ve S'''' çözümünü elde et.

S'''' çözümüne  $N_i(5)$  komşuluk yapısını uygula ve S''''' çözümünü elde et.

Adım 2.3.1: S''''' çözümü için turların uygunluğunu kontrol et.

Turlar uygunsa Adım 2.3.2'ye git.

Turlar uygun değilse tamir mekanizmasını kullanarak turları tamir et.

Tamir mekanizmasıyla turlar uygun hale getirildiyse Adım 2.3.2'ye git.

Değilse Adım 2.3.3'e git.

Adım 2.3.2: Eğer  $f(S''''') < f(S)$  ise  $S \leftarrow S'''''$  olarak belirle.

$N_k$ 'yi tüm komşuluk yapılarını içerecek şekilde güncelle.

Adım 2.3.3:  $k_r$ 'yi  $N_k$  komşuluk kümesinden çıkar.

Adım 3:  $N_k$  komşuluk kümesini kontrol et.

Eğer  $N_k = \{ \emptyset \}$  ise Adım 4'e git.

Değilse,

Adım 2'ye git.

Adım 4: Algoritmayı sonlandır.

### Şekil 3. Rassel İteratif Yerel Arama- Değişken Komşu İniş Algoritması

(Random – İterative Local Search – Variable Neighborhood Descend)

#### 5.1. Test Problemleri (Test Problems)

Önerilen matematiksel modelin etkinliğini araştırmak için Christofides (1979) tarafından geliştirilen test problemlerinden elde edilen farklı büyüklüklerdeki problemler kullanılmıştır. Dağıtım ve toplama taleplerini belirlemek için, talep ayrıştırma yöntemi olarak Salhi ve Nagy [15] ile Angelelli ve Mansini [94] tarafından önerilen talep ayrıştırma yöntemleri kullanılmıştır.

Salhi ve Nagy'nin [15] talep ayrıştırma yönteminde, her müşteri için koordinatlarına bağlı bir oran ( $r_i = \min(x_i/y_i; y_i/x_i)$ ) dikkate alınmakta ve orijinal talep değerlerinden bu oran kullanılarak dağıtım ve toplama talepleri elde edilmektedir. Bu oran kullanılarak oluşturulan problemler X tipi problemler olarak adlandırılırken, taleplerin bir sonraki müşteriye ardışık olarak kaydırılması sonucu elde edilen problemler ise Y tipi problemler olarak adlandırılmıştır. Angelelli ve Mansini [94] ise müşteri numaralarının tek ya da çift olmasına göre farklı bir ayrıştırma yöntemi geliştirmişlerdir. Her müşteri için  $d_i = q_i$ , eğer i çift ise  $p_i = [(1-$

$\gamma) * q_i]$ , i tek ise  $p_i = [(1 + \gamma) * q_i]$  olacaktır. Burada  $q_i$  test problemindeki ayrıştırılmamış talebi göstermektedir.

Dinamiklik Derecesini (DD) ölçmek için Lund vd. [58], tarafından geliştirilen denklem kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında dinamiklik derecesi %10, %20, %30, %40 ve %50 olarak ele alınmıştır. Başlangıç talebi 10 olan bir sistem için yeni gelen dinamik talep sayıları sırasıyla 1, 3, 4, 7 ve 10 olacaktır.

Çalışma kapsamında yeniden rotalamanın günde sadece bir kez yapılacağı varsayılmıştır. İlk rotalamanın yapılacağı zaman I. Aşama, dinamik taleplerin dâhil edilerek yeniden rotalamanın yapılacağı zaman ise II. Aşama olarak adlandırılmıştır. Yeniden rotalama yapılacak zaman ise gün ortası olarak kabul edilmiştir. Bu bağlamda I. Aşamadaki En Uzun Rotalı Aracın (EURA) gün boyunca dolaşımında olduğu varsayımıyla gün ortası aşığıdaki eşitlikle hesaplanmıştır. Burada  $(i,j)$  ayrıtları arasındaki mesafeler zaman birimi gibi kabul edilmiştir. Aynı tip araçlar olduğu için araçların hızları da aynı kabul edilmiştir. Yeniden eniyileme süreci tam

olarak gün ortasında planlandığı için uygulanan senaryo gereği Yeniden Rotalama Zamanı (YRZ.):

$$YRZ = \frac{EURA}{2} \quad (23)$$

Şeklinde hesaplanmıştır. Yukarıdaki senaryo varsayımları baz alınarak geliştirilen matematiksel modeli değerlendirmek amacıyla aşağıdaki performans kriterleri kullanılmıştır:

- *Eniyi çözüme ulaşılan problem sayısı (EÇUPS)*: Çözüm süresi sınırları içerisinde matematiksel model tarafından eniyi çözüme ulaşılan problem sayısı.
- *Ortalama çözüm süresi (OÇS)*: Matematiksel modelin ortalama koşum süresi.
- *Yüzde sapma değeri (YSD)*: Matematiksel modelin CPLEX çözücüsü ile iki saat tam sayılı koşumu sonucunda elde edilen üst sınır ( $Z^{US}$ ) ile alt sınır ( $Z^{AS}$ ) arasındaki sapma değeri. Bu değer, her bir test problemi için aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$YSD = \frac{Z^{US} - Z^{AS}}{Z^{AS}} \quad (24)$$

- *Bilginin değeri (BD)*: Dinamik araç rotalama problemlerinde yaygın olarak kullanılan bir karşılaştırma kriteridir [58]. Dinamik taleplerin statik olarak geldiği varsayımlar hesaplanan amaç fonksiyonu değeri ( $Z^S$ ) dinamik taleplerin aşamalı olarak geldiği durumdaki amaç fonksiyonunu değeri ( $Z^P$ ) olsun. Buna göre:

$$BD = \frac{Z^P - Z^S}{Z^S} \quad (25)$$

Şeklinde hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında araç kapasitesinin de DETD\_ARP üzerindeki etkisini görmek için 100 ve 75 olmak üzere iki farklı araç kapasitesi ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3 ve Tablo 4'de gösterilmiştir.

## 5.2. Matematiksel Model İçin Sonuçlar (Computational Results for Mathematical Model)

Tablo 3 ve Tablo 4 incelendiğinde araç kapasitenin problem üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Araç kapasitesi azaldıkça EÇUPS'nin azaldığı ve OÇS'nin önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Kapasitenin 75 olarak belirlendiği problemlerde I. Aşamada 20 boyutlu problemlerden 5 tanesi için 7200 saniye içerisinde eniyi sonuç bulunamamıştır. Diğer problemler için ise OÇS 788,055sn olarak hesaplanmıştır.

Yine problemin dinamiklik derecesi arttıkça II. Aşamada EÇUPS'nin azaldığı ve OÇS'nin arttığı gözlemlenmiştir. 15 ve 20 boyutlu problemlerde %40 ve %50 dinamiklik derecelerinde 7200 saniyelik süre içerisinde bazı problemler için eniyi çözümü bulmak mümkün olmamıştır. Çalışma kapsamında ele alınan Bilginin Değeri (BD) parametresine göre sonuçları değerlendirecek olursak dinamik taleplerin I. Aşamada bilinmesi durumunda toplam maliyetin daha az olacağını söyleyebiliriz. Ancak dinamik olarak gelen

**Tablo3.** Matematiksel model için sayısal sonuçlar (Kapasite=100) (Computational results for mathematical model (Capacity=100))

DD (%)	I. AŞAMA				II. AŞAMA						BD (%)
	N	EÇUPS	OÇS	YSD	Min (N)	Max (N)	Ort. (N)	EÇUPS	OÇS	YSD	
10	10	20	52,760	0,00	4	11	8	20	0,296	0,000	16,06
20	10	20	53,615	0,00	6	13	10	20	0,295	0,000	26,47
30	10	20	52,650	0,00	7	14	11	20	1,057	0,000	27,97
40	10	20	53,155	0,00	10	17	14	20	8,926	0,000	23,62
50	10	20	51,487	0,00	13	20	17	20	18,539	0,000	27,45
ORT.	-	100	52,723	0,00	8	15	12	100	5,823	0,00	24,31
10	15	20	106,009	0,00	6	14	10	20	0,097	0,000	15,28
20	15	20	103,370	0,00	8	16	12	20	0,259	0,000	23,67
30	15	20	103,583	0,00	10	18	14	20	2,132	0,000	30,42
40	15	20	105,955	0,00	14	22	18	19	395,446	0,234	32,56
50	15	20	103,045	0,00	19	27	23	18	1263,547	2,310	31,82
ORT.	-	100	104,392	0,00	11	19	15	97	332,296	0,509	26,75
10	20	19	788,418	0,07	6	18	11	20	0,446	0,000	26,07
20	20	19	787,443	0,07	9	21	14	20	5,542	0,000	26,11
30	20	19	791,270	0,07	13	25	18	20	447,478	0,000	31,83
40	20	19	783,471	0,07	17	29	22	14	2690,409	1,917	27,55
50	20	19	789,675	0,07	21	36	29	9	4610,495	5,559	28,52
ORT.	-	95	788,055	0,07	13	26	19	83	1550,874	1,495	28,02
GENEL	-	295	315,060	0,023	11	20	15	280	629,664	0,668	26,26

\*DD (%): Dinamiklik derecesi

\*\*BD (%): Bilginin değeri

\*\*\*Min(n), Max(n) ve Ort(n) II. Aşamaya kalan ortalama talep sayısını göstermektedir. Bu değerler hesaplanırken sayıların virgülden sonraki kısımları yuvarlanmıştır.

**Tablo 4.** Matematiksel model için sayısal sonuçlar (Kapasite=75) (Computational results for mathematical model (Capacity=75))

DD (%)	I. AŞAMA				II. AŞAMA				BD (%)		
	N	EÇUPS	OÇS	YSD	Min (N)	Max (N)	Ort. (N)	EÇUPS		OÇS	YSD
10	10	20	0,247	0,00	4	12	7	20	0,048	0,000	14,12
20	10	20	0,190	0,00	6	14	9	20	1,781	0,000	21,27
30	10	20	0,195	0,00	7	15	10	20	0,469	0,000	20,93
40	10	20	0,197	0,00	10	18	13	20	6,179	0,000	18,22
50	10	20	0,202	0,00	13	21	16	20	57,912	0,000	23,45
ORT.	-	100	0,206	0,00	8	16	11	100	13,278	0,00	19,60
10	15	20	3,608	0,00	7	14	10	20	0,105	0,000	17,98
20	15	20	3,316	0,00	9	16	12	20	0,447	0,000	30,59
30	15	20	3,697	0,00	11	18	14	20	3,709	0,000	35,99
40	15	20	3,409	0,00	15	22	18	20	361,749	0,000	38,91
50	15	20	3,330	0,00	20	27	23	16	1619,075	2,380	37,10
ORT.	-	100	3,472	0,00	12	19	15	96	397,017	0,476	32,11
10	20	20	22,959	0,00	5	15	10	20	0,096	0,000	23,88
20	20	20	22,785	0,00	8	18	13	20	1,992	0,000	31,23
30	20	20	23,070	0,00	12	22	17	20	9,415	0,000	32,39
40	20	20	23,303	0,00	16	26	21	19	431,147	0,070	30,28
50	20	20	22,924	0,00	23	33	23	17	3350,547	0,853	34,19
ORT.	-	100	23,008	0,00	13	23	17	96	758,639	0,185	30,39
GENEL	-	300	8,895	0,00	11	19	14	292	389,645	0,220	27,37

\* DD (%): Dinamiklik derecesi

\*\* BD (%): Bilginin değeri

\*\* Min(n), Max(n) ve Ort(n) II. Aşamaya kalan ortalama talep sayısını göstermektedir. Bu değerler hesaplanırken sayıların virgülden sonraki kısımları yuvarlanmıştır.

taleplerin depodan yeni bir araç çıkartılarak karşılanması durumunda maliyetin DETD\_ ARP ile elde edilen maliyetten daha yüksek olacağı da kesindir. Bu açıdan değerlendirildiğinde DETD\_ ARP, I. Aşamada tüm müşteri taleplerinin bilindiği problemin maliyetinden büyük, dinamik taleplerin depodan çıkan araç/araçlar tarafından karşılanması sonucunda elde edilen maliyetten daha küçük bir maliyet sunacaktır. Test problemleri sonucunda elde edilen bulgulara göre araç kapasitesinin 100 olduğu problem için bilginin değeri ortalama %27,37 olmuştur. Yani müşterilerin sisteme dinamik olarak dahil olması, ilk aşamada dahil olmamalarına göre, maliyeti %27,37 arttırmıştır.

DETD\_ ARP'nin amacı müşterilerden gelen yeni taleplerin dolaşımında bulunan araçlar tarafından karşılanmasıdır. Bu yüzden dolaşımında bulunan araçların rotaların çok kısa sürede yeniden belirlenmesi gerekmektedir. Tablo 4'e bakıldığında dinamiklik derecesi ve problem boyutu arttıkça çözüm sürelerinin arttığı hatta bazı problemler için 7200sn'de yeni çözümün elde edilemediği görülmüştür. Bu açıdan bakıldığında matematiksel model ile müşterilerden gelen talepler doğrultusunda dolaşımında bulunan araçların yeni rotalarının hızlı bir şekilde belirlenmesi mümkün olmayacaktır. Bu yüzden çalışma kapsamında birinci ve ikinci aşamada problemlere ait yeni ya da en iyiye yakın çözümleri hızlı bir şekilde bulabilmek için bir sezgisel algoritmanın kullanılmasına karar verilmiştir.

### 5.3. R – İYA – DKİ Algoritmasına İlişkin Sonuçlar (Computational results for R – ILS – VND Algorithm)

ETD\_ ARP ve DETD\_ ARP NP-zor problemlerdir. Matematiksel modeller ile elde edilen sonuçlar da, orta ve büyük boyutlu problemler için makul sürelerde yeni çözümün elde edilemeyeceğini göstermiştir. Bu nedenle, ele alınan ETD\_ ARP ve DETD\_ ARP'nin çözümü için bu çalışma kapsamında geliştirilen R-İYA-DKİ algoritmasının kullanılmasına karar verilmiştir. Önerilen sezgisel algoritmanın performansını değerlendirmek için matematiksel model de kullanılan test problemleri ve senaryo yaklaşımı kullanılmıştır.

DETD\_ ARP'nin çözümü için R – İYA – DKİ algoritmasında da matematiksel modelde olduğu gibi periyodik yeniden eniyileme yaklaşımı kullanılmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi periyodik yeniden eniyileme sürecinde, dolaşımında bulunan araç bilgileri (konum ve yük bilgileri) sisteme dâhil edilerek, problem statik bir ARP gibi çözülmektedir. Bu yüzden çalışma kapsamında birinci (ilk rotalama) ve ikinci (dinamik rotalama) aşamada yapısal olarak büyük farklılıklar olmadığından aynı sezgisel algoritma ve komşuluk yapıları kullanılmıştır. Sadece ikinci aşamada, birinci aşamadan farklı olarak dolaşımında bulunan araçların konum ve yük bilgileri R – İYA – DKİ algoritmasına dâhil edilmiştir. Birinci ve ikinci aşamada kullanılan sezgisel algoritmaların aynı yapıda olması ve

sadece ikinci aşamadaki girdilerin farklı olması nedeniyle; R-İYA-DKİ algoritmasının performansı, birinci aşama için değerlendirilmiştir. Önerilen R-İYA-DKİ algoritmasının performansının sadece birinci aşama sonuçlarına göre değerlendirilmesinin bir diğer nedeni ise bu sezgisel algoritma ile elde edilen sonuçların eniyi ya da en iyiye yakın çözümler olmasıdır. Ayrıca yine sezgisel algoritmanın alternatif çözümler arasından her seferinde farklı birisini bulması, sezgisel algoritmanın performansının değerlendirmesindeki objektifliği ortadan kaldıracaktır. Sezgisel algoritma ile birinci aşamada elde edilen sonuçların birbirinden farklı olması, önerilen senaryo gereği ikinci aşamaya kalacak müşterilerin farklı olmasına neden olacaktır. Örneğin 5 müşterili bir sistemde sezgisel algoritma ile elde edilen 0-1-2-3-4-5-0 rotası ile 0-5-4-3-2-1-0 rotası aynı uzunlukta olacaktır. Önerilen senaryo gereği Yeniden Rotalama Zamanına (YRZ) göre ilk ve ikinci rotada dolaşımında bulunan aracın en son 3'üncü müşteriyi ziyaret ettiğini varsayalım. Bu durumda birinci rota için ikinci aşamaya 4 ve 5'inci müşteriler kalırken ikinci rotaya göre 1ve 2'inci müşteriler ikinci aşamaya kalacaktır. Önerilen senaryo yaklaşımına göre ikinci aşamaya kalan müşteri seti farklı olabileceğinden ve her iki aşamada da kullanılan sezgisel algoritmaların yapısal olarak farklı olmaması nedeniyle önerilen sezgisel algoritmanın performansını değerlendirmek için sadece birinci aşamada elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Önerilen sezgisel algoritmaların etkinliğini değerlendirmek etmek amacıyla;

- Ortalama yüzde sapma ( $OYS = 100(ZSA - Z^*)/Z^*$ )
- ZSA: sezgisel algoritma ile bulunan uygun çözümün amaç fonksiyonu değeri,
- Z\*: problemin eniyi çözümü veya 7200 sn. içerisinde elde edilen eniyi alt sınır değeri
- En büyük yüzde sapma (EYS),
- Başlangıç çözümünden ortalama iyileşme (BÇÖİ),

- Ortalama çözüm süresi (OÇS),
- Eniyi çözüme ulaşılan problem sayısı (EÇUPS), parametreleri kullanılmıştır.

Sonuçlara bakıldığında R-İYA-DKİ algoritması ile yapılan denemelerde BÇÖİ değeri %39,88 olarak bulunmuştur. R-İYA-DKİ algoritmasının matematiksel model ile bulunan sonuçlara %3,62 oranında yakınsadığı görülmüştür. R-İYA-DKİ algoritması ile 12 problem için eniyi çözüme ulaşılmıştır. Önerilen R-İYA-DKİ algoritmasının OÇS 20 boyutlu problemler için 0,22sn, 30 boyutlu problemler için 0,50sn ve 40 boyutlu problemler için 0,86sn olarak hesaplanmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde önerilen R-İYA-DKİ algoritmasının kısa sürede en iyiye yakın çözümlere ulaşabildiği görülmüştür (Tablo 5).

Algoritmanın performansı değerlendirildikten sonra vrpnc3, vrpnc11 ve vrpnc12 test problemleri kullanılarak, önerilen R-İYA-DKİ algoritmasının DETD\_ ARP üzerindeki performansı araştırılmıştır. Performans değerlendirme kriteri olarak Başlangıç Çözümünden Ortalama İyileşme (BÇÖİ) oranı, Çözüm Süresi (ÇS) ve Bilginin Değeri (BD) kriterleri kullanılmıştır. Matematiksel modelin performansını değerlendirirken kullanılan talep ayrıştırma yöntemleri ile birinci aşaması 40 ve 50 müşterili, ikinci aşaması ise DD'ye ve önerilen senaryo yaklaşımına göre değişen X, W, Y ve Z tipi problemler üretilmiştir. Bu problemlerin R-İYA-DKİ algoritması ile çözümünden elde edilen sonuçlar Tablo 6'da gösterilmiştir.

Genel olarak sonuçlara bakıldığında önerilen R-İYA-DKİ algoritmasının birinci aşamada 40 ve 50 müşterili problemler için başlangıç çözümünü ortalama %38,90 oranında iyileştirdiği görülmüştür. Birinci aşamada BÇÖİ oranı en çok %51,29 olmuştur. İkinci aşamada önerilen R-İYA-DKİ algoritması tüm test problemleri için başlangıç çözümünü

**Tablo 5.** Önerilen sezgisel algoritmaya ilişkin sonuçlar (Computational results for heuristic algorithm)

N	TİP	R – İYA – DKİ			
		BÇÖİ (%)	EÇUPS	OÇS (sn)	OYS (%)
20	W	36,11	3	0,21	0,74
20	X	36,26	3	0,24	0,52
20	Y	36,00	1	0,25	1,86
20	Z	44,85	3	0,17	0,59
ORT. (TOP.)		38,31	10	0,22	0,93
30	W	33,76	1	0,39	3,78
30	X	47,50	1	0,57	4,54
30	Y	41,02	0	0,68	3,97
30	Z	40,83	0	0,36	4,98
ORT. (TOP.)		40,78	2	0,50	4,32
40	W	31,61	0	0,73	5,56
40	X	45,27	0	1,17	6,13
40	Y	37,83	0	1,03	5,35
40	Z	47,50	0	0,50	5,39
ORT. (TOP.)		40,55	0	0,86	5,61
GENEL ORT. (TOP.)		39,88	12	0,52	3,62

**Tablo 6.** R – İYA – DKİ algoritması ile elde edilen sonuçlar (Computational results for R – ILS – VNDS algorithm.)

TİP	PROBLEM	DD (%)	I.AŞAMA			II. AŞAMA			BD (%)
			N	OÇS (sn)	BÇOI (%)	N	OÇS (sn)	BÇOI (%)	
W	12	20	40	0,396	25,36	19	0,412	17,58	23,88
X	3	20	40	0,937	35,91	16	0,467	30,36	43,70
Y	3	20	40	1,658	40,48	31	0,702	33,43	47,30
Z	11	20	40	0,830	44,48	22	0,358	15,12	43,92
W	3	30	40	0,521	38,81	26	0,430	35,62	61,56
X	11	30	40	1,020	39,17	24	1,046	17,66	31,70
Y	3	30	40	0,983	41,02	35	0,737	47,33	47,39
Z	12	30	40	0,546	45,06	23	0,456	30,84	32,08
W	12	40	40	0,605	25,99	32	0,423	20,00	21,64
X	3	40	40	0,852	33,23	37	0,777	39,77	78,28
Y	12	40	40	1,032	33,43	38	0,624	37,41	33,87
Z	3	40	40	0,763	45,42	33	0,366	21,60	90,02
W	11	50	40	0,920	47,18	53	0,670	14,13	58,20
X	11	50	40	1,698	39,83	49	4,511	44,05	23,37
Y	3	50	40	1,426	41,55	54	1,450	52,57	35,78
Z	12	50	40	1,020	44,31	44	0,544	26,21	46,05
W	3	20	50	1,020	45,43	27	0,512	16,35	65,50
X	3	20	50	1,571	29,98	30	1,342	42,98	59,29
Y	12	20	50	1,716	36,94	40	0,762	16,35	31,46
Z	11	20	50	1,288	49,70	26	0,750	4,12	29,24
W	12	30	50	1,150	16,00	28	0,472	17,46	32,36
X	11	30	50	2,863	36,89	36	1,174	20,76	32,40
Y	3	30	50	1,987	50,38	38	2,641	51,40	64,40
Z	3	30	50	0,784	47,47	31	0,609	31,86	74,07
W	11	40	50	0,179	38,65	43	0,778	13,55	44,62
X	12	40	50	2,571	38,39	52	0,978	36,57	55,22
Y	11	40	50	3,337	29,65	45	1,207	18,99	56,71
Z	12	40	50	0,768	40,17	39	0,591	22,19	51,02
W	3	50	50	1,010	44,02	66	0,823	32,15	43,51
X	3	50	50	2,161	33,17	60	2,685	45,04	56,88
Y	12	50	50	1,491	35,36	70	1,809	43,82	57,73
Z	3	50	50	2,380	51,29	65	0,761	34,16	37,06
ORTALAMA				1,296	38,90		0,996	29,11	47,19

ortalama %29,11 oranında iyileştirmiştir. İkinci aşama için en iyi BÇOI oranı %52,57'dir. Önerilen sezgisel algoritmanın performansını çözüm süresi açısından değerlendirecek olursak, tüm örnek problemler için birinci aşamada OÇS 1,296sn olarak hesaplanmıştır. İkinci aşamada ise OÇS 0,996sn olarak bulunmuştur. Birinci aşamada en uzun çözüm süresi 2,863sn iken, ikinci aşamada 4,511sn'dir. DARP'de önemli bir performans kriteri olan ve dinamik olarak gelen müşteri taleplerinin rotalamasının en başında bilinmesi durumundaki maliyet ile dinamik olarak gelmesi durumundaki maliyeti kıyaslayan Bilginin Değeri (BD) açısından sonuçları değerlendirecek olursak; tüm problemler için BD ortalama %47,19'dur. Bu sonuca göre müşteri taleplerinin rotalamasının en başında bilinmesi durumunda ortalama maliyeti %47,19 oranında daha az olacaktır. Yine BD açısından en büyük oran %90,02, en küçük oran ise %21,64 olarak bulunmuştur.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışma kapsamında Dinamik Eş Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (DETD\_ ARP) ele alınmıştır. Problemin çözümü için literatürde yer alan bir akış tabanlı model DETD\_ ARP'ye uyarlanarak DETD\_ ARP için yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir. DETD\_ ARP, NP-zor bir problem olduğu için kademeli olarak problem boyutu artırılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 15 ve 20 boyutlu problemler için %40 ve %50 dinamiklik derecesinde bazı problemlerin 7200 saniye içerisinde en iyi çözüme ulaşamadığı ve çözüm sürelerinin üstel olarak arttığı görülmüştür. DETD\_ ARP, NP-zor bir problem olduğu için yapılan deneysel çalışmalar 20 boyutlu ve %50 dinamiklik derecesine sahip problemlerle sınırlandırılmıştır.

Geliştirilen yeni matematiksel modelin küçük boyutlu problemler için kullanılabileceği görülmüştür. Bu yüzden çalışma kapsamında orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için sezgisel algoritmaların kullanılmasına karar verilmiştir. DETD\_ ARP'nin çözümü için literatürde bulunan ve İteratif Yerel Arama (İYA) ile Değişken Komşu İniş (DKİ) algoritmalarını birlikte kullanan bir algoritmadan yeni bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Literatürdeki algoritmada İYA kısmında komşuluk yapılarının sırası sabitken önerilen algoritmada İYA'da komşuluk yapılarının uygulama sırası her aşamada rassal olarak değiştirilmiştir. Önerilen algoritma Rassal İteratif Yerel Arama Değişken Komşu İniş (R-İYA-DKİ) algoritması olarak adlandırılmıştır. Sezgisel algoritmanın performansını değerlendirmek için çeşitli sayısal analizler yapılmış ve önerilen algoritmanın kısa sürede iyi çözümlere ulaşabildiği görülmüştür. Problemin birinci aşamasında sezgisel algoritma ile elde edilen sonuçlar matematiksel model ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, R-İYA-DKİ algoritması ile 60 problemde 12 tanesi için yeni çözümler elde edildiği görülmüştür. Ayrıca bu problemler için sezgisel algoritma ile elde edilen sonuçların matematiksel model ile elde edilen sonuçlara %3,62 oranında yakınsadığı görülmüştür. Sezgisel algoritmanın OÇS ise 0,52sn'dir. Elde edilen bu sonuçlar önerilen sezgisel algoritmanın kısa sürede iyi çözümlere ulaştığını göstermiştir. Son olarak çalışma kapsamına önerilen sezgisel algoritma orta ve büyük boyutlu DETD\_ ARP'nin çözümünde kullanılmıştır. Talep ayrıştırma yöntemleri ile birinci aşaması 40 ve 50 müşteri, ikinci aşaması ise DD'ye ve önerilen senaryo yaklaşımına göre değişen X, W, Y ve Z tipi problemler önerilen R-İYA-DKİ algoritması ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre önerilen sezgisel algoritmanın birinci aşamada başlangıç çözümünü ortalama %38,90, ikinci aşamada ise %29,11 oranında iyileştirdiği görülmüştür. Ortalama çözüm süreleri ise birinci aşama için 1,296sn ikinci aşama için ise 0,996sn olmuştur. Bilginin değeri ise tüm problemler için %47,19 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak önerilen sezgisel algoritma ile DETD\_ ARP için iyi çözümlere çok kısa sürelerde ulaşılabilmektedir. Bu bağlamda gerçek hayatta hızlı ve isabetli karar almak gerektiğinden; DETD\_ ARP gibi NP-zor problemlerin çözümü için sezgisel algoritmalar yararlanmak büyük avantajlar sağlayacaktır. Özellikle DETD\_ ARP için yeniden rotalama zamanı ne kadar kısa olursa dolaşımdaki araçların yeni rotaları da o kadar kısa sürede belirlenebilecektir. İleride yapılacak çalışmalarda DETD\_ ARP için daha kısa sürede daha kaliteli çözümler elde edebilecek sezgisel algoritmalar geliştirilebilir. Yine küçük ve orta boyutlu DETD-ARP için kesin çözüm veren dal-kesme ya da dal-fiyat algoritması gibi yöntemler kullanılabilir. Ayrıca müşterilerden gelen yeni taleplerin dolaşımda bulunan araçlar tarafından karşılanıp karşılanmama kararı için önerilen matematiksel model ve sezgisel yaklaşım Karar Destek Sistemleri (KDS) içerisinde de kullanılabilir.

## 6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Dantzig, G. B., and Ramser, J. H., The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6 (1), 80-91,1959.
2. Clarke, G. and Wright, J. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12, 568-581,1964.
3. Erol, V., Araç rotalama problemleri için popülasyon ve komşuluk tabanlı metasezgisel bir algoritmanın tasarımı ve uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
4. Irnich, S., Toth, P., and Vigo, D., Chapter 1: The family of vehicle routing problems, *Vehicle routing: problems, methods, and applications*, Editör: Toth, P., and Vigo, D., Society for Industrial and Applied Mathematics, 2, 2014.
5. Laporte, G., Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43 (4), 408-416, 2009.
6. Laporte, G., The traveling salesman problem, the vehicle routing problem, and their impact on combinatorial optimization, *International Journal of Strategic Decision Sciences*, 1 (2), 82-92, 2010.
7. Weise T., P. A., Planning and packing problems, solving real-world vehicle routing problems with evolutionary algorithms, *Natural Intelligence for Scheduling*, Warsaw: Springer, 2010.
8. Göksal, F., Eşzamanlı topla-dağıt araç rotalama problemi için sezgisel yaklaşımlar: genetik algoritma ve kuş sürüsü eniyileme, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
9. Ropke, S., Pisinger., D., A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhauls, *European Journal of Operational Research*, 171 (3), 750-775, 2006.
10. Berbeglia, G. , Cordeau, J.-F., Gribkovskaia, I., Laporte, G., Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *TOP Off. J. Span. Soc. Stat. Oper. Res.* 15, 1-31, 2007.
11. Parragh, S.N. , Doerner, K.F. , Hartl, R.F., A survey on pickup and delivery problems. part I: transportation between customers and depot. *J. Betr.* 58, 21-51, 2008a.
12. Parragh, S.N., Doerner, K.F. , Hartl, R.F., A survey on pickup and delivery problems. Part II: transportation between pickup and delivery locations. *J. Betr.* 58, 81-117, 2008b.
13. Min, H., The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup points, *Transportation Research A*, 23 (5), 377- 386, 1989.
14. Halse, K., Modeling and solving complex vehicle routing problems, Ph.D thesis, Technical University of Denmark, Institute of Mathematical Statistics and Operations Research, 1992.
15. Salhi, S., Nagy, G., A cluster insertion heuristic for single and multiple depot vehicle routing problems with backhauling, *Journal of the Operational Research Society*, 50 (10), 1034-1042, 1999.
16. Dethloff, J., Vehicle routing and reverse logistics: The vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up, *OR Spektrum*, 23 (1), 79-96, 2001.
17. Tang, F.A., Galvao, R.D., Vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service, *Journal of the Operational Research Society of India*, 39, 19-33, 2002.



18. Nagy, G., Salhi, S., Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries, *European Journal of Operational Research*, 162 (1), 126–141, 2005.
19. Crispim, J., Brandao, J., “Metaheuristics applied to mixed and simultaneous extensions of vehicle routing problems with backhauls”, *Journal of the Operational Research Society*, 56, 1296–1302, 2005.
20. Dell’Amico, M., Righini, G., Salani, M., A branch-and-price approach to the vehicle routing problem with simultaneous distribution and collection, *Transportation Science*, 40 (2), 235–247, 2006.
21. Chen, J. F., Approaches for the vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 23 (2), 141–150, 2006.
22. Chen, J. F., Wu., T. H., Vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups, *The journal of the Operational Research Society*, 57 (5), 579–587, 2006.
23. Montane, F. A. T., Galvao, R. D., A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service, *Computers and Operations Research*, 33 (3), 595–619, 2006.
24. Gencer C., Yaşa Ö., Simultaneous Pick-Up And Delivery Decision Support Systems Of Transportation Command Shuttle Tour’s, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 22 (3), 437–449, 2007.
25. Wassan, N. A., Wassan, A. H., Nagy, G., A reactive tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries, *Journal of Combinatorial Optimization*, 15 (4), 368–86, 2007.
26. Bianchessi, N., Righini, G., Heuristic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-Up And Delivery, *Computers & Operations Research*, 34, 578- 594, 2009.
27. Zachariadis, E. E., Tarantilis, C. D., Kiranoudis, C. T., An adaptive memory methodology optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries, *European Journal of Operational Research*, 202 (2), 401–411, 2009a.
28. Zachariadis, E. E., Tarantilis, C. D., Kiranoudis, C. T., An adaptive memory methodology optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 202 (2), 401- 411, 2009b.
29. Ai T., Kachitvichyanukul V., A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Computers & Operations Research*, 36, 1693–1702, 2009.
30. Gajpal, Y., Abad, P., An ant colony system (ACS) for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup, *Computers & Operations Research*, 36 (12), 3215–3223, 2009.
31. Çetin S., Gencer C., Vehicle routing problems with hard time windows and simultaneous pick up and delivery: A mathematical model, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (3), 579–585, 2010.
32. Subramanian, A., Drummond, L. M. A., Bentes, C., Ochi, L. S., Farias, R., A parallel heuristic for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery, *Computers and Operations Research*, 37 (11), 1899–1911, 2010.
33. Mingyong, L., and Erbao, C., An improved differential evolution algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries and time Windows, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23, 188–195, 2010.
34. Subramanian, A., Uchoa, E., Pessoa, A. A., Ochi, L. S., Branch-and-cut with lazy separation for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Operations Research Letters*, 39, 338–341, 2011.
35. Zachariadis, E. E., Kiranoudis, C. T., A local search metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. *Expert Systems with Applications*, 38, 2717–2726, 2011.
36. Tasan, A.S., Gen, M., A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries, *Computers & Industrial Engineering*, 62 (3), 755–761, 2012.
37. Wang, H.F., Chen Y.Y, A genetic algorithm for the simultaneous delivery and pickup problems with time window, *Computers & Industrial Engineering*, 62 (1), 84–95, 2012.
38. Cruz, R.C., Silva, T.C.B, Souza M.J.F., Coelho, V.N., Mine M.T., Martins, A.X., GENVNS-TS-CL-PR: A heuristic approach for solving the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 39, 217–224, 2012.
39. Zhang, T., Chaovalitwongse, W.A., Zhang Y., Scatter search for the stochastic travel-time vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries, *Computers & Operations Research*, 39, 2277–2290, 2012.
40. Goksal, F. P., Karaoglan, I, Altiparmak, F., A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Computers and Industrial Engineering*, 65 (1), 39–53, 2013.
41. Hezer S., Kara Y., Solving vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up using an algorithm based on bacterial foraging optimization, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (2), 373–382, 2013.
42. Liu R., Xie, X., Augusto V., Rodriguez C., Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care, *European Journal of Operational Research*, 230, 475–486, 2013.
43. Avci, M., Topaloğlu, S., An adaptive local search algorithm for vehicle routing problem with simultaneous and mixed pickups and deliveries, *Computers & Industrial Engineering*, 83, 15–29, 2015.
44. Gschwind, T., A comparison of column generation approaches to the synchronized pickup and delivery problem. *European Journal of Operational Research*, 247, 60–71, 2015.

45. Keçeci B., Altıparmak F., Kara İ., Heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: mathematical formulations and a heuristic algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (2), 185-195, 2015.
46. Wang, C., Mu, D., Zhao, F., Sutherland, J.W., A parallel simulated annealing method for the vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time Windows, *Computers & Industrial Engineering*, 83, 111-122, 2015.
47. Li, J., Pardalos, P.M., Sun, H., Pei, J., Zhang, Y., Iterated local search embedded adaptive neighborhood selection approach for the multi-depot vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups, *Expert Systems with Applications*, 42, 3551-3561, 2015.
48. Zachariadis E.E., Tarantilis C.D. and Kiranoudis, C.T., The vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries and two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, 251 (2), 369-386, 2016.
49. Kalayci, C.B. and Kaya, C., An ant colony system empowered variable neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Expert Systems with Applications*, 66, 163-175, 2016.
50. Iassinovskaia, G., Limbourg, S. and Riane, F., The inventory-routing problem of returnable transport items with time windows and simultaneous pickup and delivery in closed-loop supply chains. *International Journal Production Economics*, 183, 570-582, 2017.
51. Bayrak, A. ve Özyörük, B., Comparative mathematical models for split delivery simultaneous pickup and delivery vehicle routing problem. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (2), 469-479, 2017.
52. Zhu, L., Sheu, J-B., Failure-specific cooperative recourse strategy for simultaneous pickup and delivery problem with stochastic demands, *European Journal of Operational Research*, 271, 3, 896-912, 2018.
53. Belgin, O., Karaoglan, I., Altıparmak, F., Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and heuristic approach, *Computers & Industrial Engineering*, 115, 1-16, 2018.
54. Zhang, Z., Cheang, B., Li, C., Lim, A., Multi-commodity demand fulfillment via simultaneous pickup and delivery for a fast fashion retailer, *Computers & Operations Research*, 103, 81-96, 2019.
55. Psaraftis, H.N., *Vehicle routing: methods and studies*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1988.
56. Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., Medaglia, A.L., A review of dynamic vehicle routing problems, *European Journal of Operational Research*, 225 (1), 1-11, 2013.
57. Taillard, E.D., Gambardella, L.M., Gendreau, M., Potvin, J.-Y., Adaptive memory programming: a unified view of metaheuristics, *European Journal of Operational Research*, 135 (1), 1-16, 2001.
58. Lund K., Madsen O., Rygaard J., Vehicle routing problems with varying degrees of dynamism, Technical report, IMM. Department of Mathematical Modeling, Technical University of Denmark, Kogens, Lyngby, Denmark, 1996.
59. Bent, R.W., Hentenryck, P.V., Scenario-Based Planning for Partially Dynamic Vehicle Routing with Stochastic Customers, 52 (6), 977-987, 2004.
60. Du, T.C., Li, E., Y., Chou, D., Dynamic vehicle routing for online B2C delivery, *Omega*, 33, 33 - 45, 2005.
61. Montemanni, R., Gambardella, L.M., Rizzoli, A.E., Donati, A.V., Ant Colony System for a Dynamic Vehicle Routing Problem, *Journal of Combinatorial Optimization*, 10, 327-343, 2005.
62. Haghani, A., Jung, S., A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times, *Computers & Operations Research*, 32, 2959-2986, 2005.
63. Hanshar, F.T., Ombuki-Berman, B.M., Dynamic vehicle routing using genetic algorithms, *Applied Intelligence*, 27, 89-99, 2007.
64. Cheunga, B.K-S, Choyb, K.L., Lic, C-L., Shid, W., Tange, J., Dynamic routing model and solution methods for fleet management with mobile technologies, *International Journal of Production Economics*, 113, 694-705, 2008.
65. Liao, T.S., Hu, T-Y., An object-oriented evaluation framework for dynamic vehicle routing problems under real-time information, *Expert Systems with Applications*, 38, 12548-12558, 2011.
66. Pillac, V., Guéret, C., Medaglia, A.L., An event-driven optimization framework for dynamic vehicle routing, *Decision Support Systems*, 54, 414-423, 2012.
67. Azi, N., Gendreau, M., Potvin, J-W, A dynamic vehicle routing problem with multiple delivery routes, *Annals of Operation Research*, 199, 103-112, 2012.
68. Ferrucci, F., Bock, S., Gendreau, M., A pro-active real-time control approach for dynamic vehicle routing problems dealing with the delivery of urgent goods, *European Journal of Operational Research*, 225, 130-141, 2013.
69. Xu, Y., Wang, L., and Yang, Y., Dynamic Vehicle Routing Using an Improved Variable Neighborhood Search Algorithm, *Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics* 2013 (2013), 12, 2013.
70. Ghannadpoura, S.F., Nooria, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Ghoseiri, K., A multi-objective dynamic vehicle routing problem with fuzzy timewindows: Model, solution and application, *Applied Soft Computing*, 14, 504-527, 2014.
71. Mavrovouniotis, M., Yang, S., Ant algorithms with immigrants schemes for the dynamic vehicle routing problem, *Information Sciences*, 294, 456-477, 2015.
72. Euchi, J., Yassine, A., Chabchoub, H., The dynamic vehicle routing problem: Solution with hybrid metaheuristic approach, *Swarm and Evolutionary Computation*, 21, 41-53, 2015.
73. Schyns, M., An ant colony system for responsive dynamic vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 245, 704-718, 2015.

74. Barkaoui, M., Berger, J. and Boukhtouta, A., Customer satisfaction in dynamic vehicle routing problem with time windows. *Applied Soft Computing*, 35, 423–432, 2015.
75. Kuo, R.J., Wibowo, B.S. and Zulvia, F.E., Application of a fuzzy ant colony system to solve the dynamic vehicle routing problem with uncertain service time. *Applied Mathematical Modelling*, 40, 9990–10001, 2016.
76. AbdAllah, A.M.F.M., Essam, D.L. and Sarker R.A., On solving periodic re-optimization dynamic vehicle routing problems. *Applied Soft Computing*, 55, 1–12, 2017.
77. Chen, S., Chen, R., Wang, G., Gao, J., Sangaiah, A.R., An adaptive large neighborhood search heuristic for dynamic vehicle routing problems, *Computers & Electrical Engineering*, 67, 596-607, 2018.
78. Ulmer, M.W., Soeffker, N., Mattfeld, D.C., Value function approximation for dynamic multi-period vehicle routing, *European Journal of Operational Research*, 269 (3), 883-899, 2018.
79. Sabar, N.R., Bhaskar, A., Chung, E., Turkey, A., Song, A., A self-adaptive evolutionary algorithm for dynamic vehicle routing problems with traffic congestion, *Swarm and Evolutionary Computation*, 44, 1018-1027, 2019.
80. Okulewicz, M., Mańdziuk, J., A metaheuristic approach to solve Dynamic Vehicle Routing Problem in continuous search space, *Swarm and Evolutionary Computation*, 48, 44-61, 2019.
81. Bektaş, T., Repoussis, P. P., Tarantilis, C. D., Chapter 11: Dynamic vehicle routing problems. In *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, Second Edition, Society for Industrial and Applied Mathematics, 299-347, 2014.
82. Karaoğlan, İ., Dağıtım Ağları Tasarımında Yer Seçimi Ve Eşzamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemleri, Doktor Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
83. Keçeci, B., Heterojen Eş-Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi İçin Matematiksel Modeller Ve Sezgisel Yaklaşımlar, Doktor Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2014.
84. Ekizler, H., Araç Rotalama Probleminin Çözümünde Karınca Kolonisi Optimizasyonu Algoritmasının Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 24, 2011.
85. Subramanian, A., Ochi, L. S., and Cabral, L.A.F., An efficient ILS heuristic for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery, *Instituto de Computação – UFF*, Technical Report – RT 07/08, 2012.
86. Penna, P. H. V., Subramanian, A., and Ochi, L. S., An iterated local search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Journal of Heuristics*, 19, 201–232, 2013.
87. Potvin, J-Y., and Rousseau, J-M., An exchange heuristic for routing problems with time windows. *The Journal of the Operational Research Society*, 46 (12), 1433-1446, 1995.
88. Nagy, G., Salhi, S., Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 162 (1), 126–141, 2005.
89. Osman, I.H., and Christofides, N., Simulated annealing and descent algorithms for capacitated clustering problem, *Research Report*, Imperial College, University of London, 1989.
90. Subramanian, A., Drummond, L. M. A., Bentes, C., Ochi, L. S., and Farias, R., A parallel heuristic for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Computers and Operations Research*, 37 (11), 1899-1911, 2010.
91. Tan, K.C., Lee, L.H., Zhu, Q.L., and Ou, K., Heuristic methods for vehicle routing problem with time Windows. *Artificial Intelligence in Engineering*, 15, 281-295, 2001.
92. Subramanian, A., Penna, P. H. V., Uchoa, E., Ochi, L. S., A hybrid algorithm for the Heterogeneous Fleet Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 221 (2), 285-295, 2012.
93. Taillard, E., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J-Y., A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows. *Transportation Science*, 31, 170-186, 1997.
94. Angelelli, E., Mansini, R., *Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management*, Editörler: Klose, A., Speranza, M. G., Van Wassenhove, L. N., Springer-Verlag, Berlin, 249-267, 2002.