



A mathematical model for the time dependent vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery

Gözde Can Atasagun*^{ID}, İsmail Karaoğlan^{ID}

Department of Industrial Engineering, Konya Technical University, KONYA, 42050, Turkey

Highlights:

- Time dependent vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery is considered
- A mixed integer programming formulation is developed for the problem
- Performance of the model is tested on test instances

Keywords:

- Vehicle routing problem
- Simultaneous pick-up and delivery
- Time dependent vehicle routing problem

Article Info:

Research Article
Received: 16.01.2018
Accepted: 28.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571515

Correspondence:

Author: Gözde Can Atasagun
e-mail:
gcatasagun@ktun.edu.tr
phone: +90 332 223 8690

Graphical/Tabular Abstract

In this study, Time Dependent Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-Up and Delivery (TD_VRP_SPD) which has not been considered in the literature, is described for the first time and a mathematical model is proposed for the solution of the problem. Experimental studies of the proposed mathematical model are performed on well-known test problems of the literature and the results are interpreted. Performance of the model evaluated computation time and percentage deviations to the optimal solutions. Figure A shows the average of C, R and RC type problems. The results of 112 problems were found to be optimal for 3 problems. All three of these problems are RC type problems. Despite the optimal result in the type of RC problems, the higher gap value indicates the difficulty of the problem.

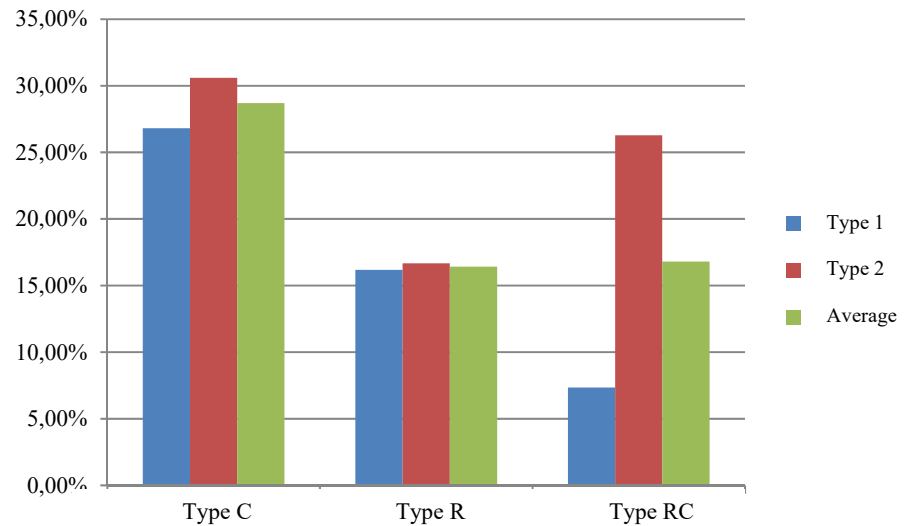


Figure A. Averages of C, R and RC type problems

Purpose: The aim of this study is to introduce the TD_VRP_SPD problem which has not been studied yet and to develop a mathematical model for this problem.

Theory and Methods: A mathematical model is proposed for the solution of the problem. The proposed model has a linear structure that provides the “first-in-first-out” (FIFO) feature and uses the time-dependent speed function.

Results: Experimental studies of the proposed mathematical model are performed on well-known test problems of the literature and the results are interpreted. Performance of the model evaluated computation time and percentage deviations to optimal.

Conclusion: It is not possible to reach the optimal solutions in medium and large size problems using the proposed mathematical model. For further studies, heuristic/meta-heuristic methods can be developed. In the next step, an exact algorithm can be developed with the help of the proposed mathematical model, the heuristic method and the valid inequalities.



Zaman bağımlı eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi için bir matematiksel model

Gözde Can Atasagun*^{ID}, İsmail Karaoğlan^{ID}

Konya Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, KONYA, 42050, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Zaman bağımlı eş zamanlı topla-dağıt araç rotalama problemi ele alınmıştır
- Problemin çözümü için karma tam sayılı matematiksel model geliştirilmiştir
- Test problemleri üzerinde matematiksel modelin performansı incelenmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.01.2018

Kabul: 28.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571515

ÖZET

Bu çalışmada zaman bağımlı araç rotalama problemi (ZB_ ARP) ve topla-dağıt araç rotalama problemi (TD_ ARP) birlikte ele alınmıştır. Zaman Bağımlı Eşzamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi (ZB_ETD_ ARP) olarak adlandırılan ve literatürde henüz ele alınmamış olan bu problem ilk kez tanımlanmış ve çözümü için bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen model, ilk giren ilk çıkar (FIFO) özelliğini sağlayan ve zamana bağlı hız fonksiyonunu kullanan doğrusal bir yapıya sahiptir. Geliştirilen matematiksel model literatürde mevcut problemler üzerinde test edilmiş ve yorumlanmıştır. Modelin performansı en iyi çözüme ulaşma zamanı ve en iyi çözümden yüzde sapma değeri açısından değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler:

Araç rotalama problemi,
eş zamanlı topla dağıt araç
rotalama problemi,
zaman bağımlı araç rotalama
problemi

A mathematical model for the time dependent vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery

H I G H L I G H T S

- Time dependent vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery is considered
- A mixed integer programming formulation is developed for the problem
- Performance of the model is tested on test instances

Article Info

Research Article

Received: 16.01.2018

Accepted: 28.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571515

Keywords:

Vehicle routing problem,
simultaneous pick-up and
delivery vehicle routing
problem,
time dependent vehicle
routing problem

ABSTRACT

In this study, the Time Dependent Vehicle Routing Problem (TDVRP) and the Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivery (VRPPD) are considered simultaneously. This problem, which is called as the Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery (TD_VRP_SPD) and has not been considered in the literature, is described for the first time and a mathematical model is proposed for the solution of the problem. The proposed model has a linear structure that provides the "first-in-first-out" (FIFO) feature and uses the time-dependent speed function. Experimental studies of the proposed mathematical model are performed on well-known test problems of the literature and the results are interpreted. Performance of the model evaluated computation time and percentage deviations to optimal.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Araç Rotalama Problemi (ARP), bir depodan başlayarak, belirli bir coğrafi alana dağılmış olarak bulunan müşterilere giden ve tekrar depoya dönen, toplam maliyeti en küçüklemeyi amaçlayarak, depodan çıkan araç sayısı kadar rotanın bulunması olarak tanımlanabilir. ARP’de her müşterinin yalnızca bir kez ziyaret edilmesi, tüm rotaların depodan başlayıp depoda bitmesi gibi temel kısıtların yanı sıra diğer bazı kısıtların da sağlanması gerekir. ARP ile ilgili yapılan çalışmaların çok büyük bir kısmında düğümler arası ulaşım süresinin sabit kabul edildiği görölmektedir. Zaman Bağımlı Araç Rotalama Problemi (ZB_ ARP)’nde ise düğümler arası ulaşım sürelerinin gün içerisinde değiştirdiği durum ele alınmaktadır [1]. Planlama periyodunun zaman aralıklarına bölünmesi ve bu zaman aralıklarında her bir yol için sabit bir hızın tanımlanması durumu söz konusudur. Bir düğümden çıkan araç çıkış zamanına ve kullanacağı yola bağlı olarak belli bir hız ile bir sonraki düğüme seyahat etmektedir. Eğer seyahat esnasında sıradaki düğüme bir sonraki zaman diliminde geçiş olursa, araç yeni zaman dilimi için tanımlanmış olan hız ile yoluna devam edecektir [1].

Zamana bağlı ulaşım süreleri ilk kez Malandraki ve Daskin [2, 3] tarafından, ZB_ ARP ve Zaman Bağımlı Gezgin Satıcı Problemi (ZB_ GSP) üzerinde ele alınmıştır. Bu çalışmada, “Zamana Bağlı Adımsal Ulaşım Süresi Fonksiyonu; ZBAUSF (stepwise travel time function)” kullanılmış, düğümler için zaman pencereleri dikkate alınmış ve müşterilerde beklemelere izin verilmiştir. Hill ve Benton [4] tarafından yapılan çalışmada ise aracın bir düğümden çıkış zamanına bağlı ulaşım süresi kullanmak yerine hız değeri kullanılmıştır. Buna ek olarak hız sürelerinin tahminine yönelik de bir çalışma yapılmıştır. Problemin çözümü için sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Malandraki ve Dial [5] yapmış oldukları çalışmalarında ZB_ GSP için dinamik programlama yaklaşımı geliştirmişlerdir. Park [6], iki kriterli zaman ve alan bağımlı araç çizelgeleme problemini dikkate almıştır. Problem için karma tamsayı doğrusal programlama modeli oluşturmuş ve çözüm için iki kriterli kazanç algoritmasını önermiştir. Jung ve Haghani [7], çalışmalarında ZB_ ARP için bir matematiksel model ve bir genetik algoritma önermişlerdir. Önerilen genetik algoritma küçük boyutlu 33 test probleminden sadece 2 adedinde eniyi çözüme ulaşamamışken en büyük sapma %5’den daha azdır. Büyük boyutlu problemlerde ise kesin çözümle genetik algoritma arasındaki en büyük sapma %7’den küçük çıkmıştır.

2003 yılında Ichoua vd. [8] tarafından yapılan çalışmaya kadar ZB_ ARP üzerine yapılan çalışmalarda Zamana Bağlı Adımsal Ulaşım Süresi Fonksiyonu (ZBAUSF) kullanılmıştır. ZBAUSF, aracın daha hızlı gidebileceği zaman aralığına kadar müşterilerde beklemesine izin veren varsayımı içermektedir ancak bu varsayım pratik hayata pek uygun değildir. Zamana Bağlı Hız Fonksiyonu (ZBHF) yaklaşımı ise ilk giren ilk çıkar (*First In First Out* - FIFO) özelliğini en iyi şekilde sağlayan ve pratiğe oldukça yakın bir

varsayımdır. İlk kez Ichoua vd. [8] tarafından literatüre kazandırılmış olan bu yaklaşımda, ZBAUSF’de olduğu gibi planlama periyodu zaman dilimlerine bölünmektedir ve her düğüm için aracın çıkış zamanını göz önüne alan bir hız fonksiyonu tanımlanmaktadır. Aracın düğümden çıktığı zaman ne olursa olsun araç bir düğümden ne kadar erken çıkarsa bir sonraki düğüme o kadar erken ulaşacaktır.

Ichoua vd. [8] bu çalışmalarında gevşek zaman pencereli ZB_ ARP için Tabu Arama (TA) algoritması geliştirmişlerdir. Fleischmann vd. [9] tarafından yapılan bir çalışmada ARP için geliştirilen basit sezgisel yöntemler (Kazanç Algoritması (Saving Algorithm), Sıralı Ekleme Algoritması (Sequentil Insertion Heuristic), vb.) ZB_ ARP için uyarlanarak, Berlin şehri için 216 zaman aralığından oluşan bir gerçek hayat problemi ve 7 adet test problemi çözülmüştür. Haghani ve Jung [10], zaman bağımlı dinamik ARP (ZB_ DARP) için bir genetik algoritma önermişlerdir. Chen vd. [11], 2006 yılında yaptıkları çalışmada ise dinamik zamanlı ZB_ ARP ele almışlardır. Bu problemde bazı müşterilerin talepleri planlama periyodunun başında bilinirken, bazı müşterilerin talepleri ise periyot içerisinde ortaya çıkmaktadır. Bu durumda, yeni talepler ortaya çıktığı zaman, araçların mevcut durumları da göz önüne alınarak, yeni bir dağıtım planı belirlemek gerekmektedir. Problem için bir matematiksel model ve sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Woensel vd. [12], oldukça gerçekçi bir yaklaşım olan ve trafik sıklığına da göz önüne alan kuyruk teorisine dayalı bir sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir. Woensel vd. [13] bir sonraki çalışmalarında zaman bağımlı ARP’yi çözmek için bir tabu arama algoritması geliştirmişlerdir. Seyahat sürelerini belirlemek için kuyruk teorisine dayalı ve araç hacmiyle bağlantılı yaklaşımlar kullanmışlardır. Xin vd. [14] tarafından yapılan bir çalışmada ise dinamik ve statik ZB_ ARP için Genetik Algoritma (GA) önerilmiştir. Hashimoto vd. [15] tarafından yapılan çalışmada ise Zaman Pencereli ZB_ ARP (ZP_ ZB_ ARP) için doğrusal olmayan bir matematiksel model ve sezgisel geliştirilmiştir. Kuo vd. [16] tarafından yapılan bir çalışmada ZB_ ARP ele alınmış ve problemin çözümü için TA algoritması geliştirilmiştir. Soler vd. [17], çalışmalarında ZP_ ZB_ ARP’yi değişik dönüşüm teknikleri ile Asimetrik Araç Rotalama Problemine (AARP) dönüştürmüş ve bilinen çözüm yöntemleri ile çözülebileceğine değinmişlerdir. Çalışmada herhangi bir deneysel sonuç bulunmamaktadır. Jabali vd. [18], stokastik ZB_ ARP’yi ele aldıkları çalışmalarında müşterilerde beklenmedik gecikmeleri de ele almışlardır. Problemin çözümü için TA algoritması önermişler ve literatürden türettikleri test problemleri üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Kuo [19], tarafından yapılan çalışmada ise ZB_ ARP’de harcanan yakıtın enazlanması için Tavlama Benzetimi (TB) algoritması geliştirilmiştir. Önerilen TB algoritması literatürden türetilen test problemleri üzerinde, literatürde daha önce kullanılan amaç fonksiyonları da (toplam rota uzunluğu ve toplam rota süresi) dikkate alınarak çözülmüş ve bu amaç fonksiyonları arasındaki ilişki incelenmiştir.

Figliozi [20]'nin yaptığı çalışma literatürde bu alanda yapılan ilk çalışmadır. ZB_ ARP'de CO_2 salınımı dikkate alan bir matematiksel model önerilmiştir. ZP_ZB_ ARP'yi gerçek bir problem üzerinde ele alarak trafik durumunun CO_2 salınımı üzerindeki etkisini ölçmüştür. Ölçümleri sonucunda trafiğin ve araç hızının, CO_2 salınımı üzerinde önemli etkileri olduğunu tespit etmiştir. Figliozi [21] yaptığı bir diğer çalışmada ise sıkı ve esnek zaman pencere problemleri için bir sezgisel algoritma geliştirmiştir. Kritzingler vd. [22] gerçek trafik bilgilerini kullanarak Viyana şehri için bir değişken komşu arama (DKA) sezgiseli önermişlerdir. Dabia vd. [23], 2013 yılında yapmış oldukları çalışmada ZP_ZB_ ARP için dal-fiyat algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritmayı literatürde var olan test problemlerine zaman bağımlı kısıtlar ekleyerek çözmüşler ve 25 müşteri problemleri için %63, 50 müşteri problemleri için %38 ve 100 müşteri problemleri için %15 oranında başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Koç ve Karaoğlan [1], ZB_ ARP için doğrusal bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri matematiksel modeli literatürde bulunan test problemleri ile çözerek üç farklı senaryo analizi gerçekleştirmişlerdir. Mousavipour ve Hojjati [24] 2014 yılındaki çalışmalarında ZB_ ARP için trafik akışına dayalı bir matematiksel model önermişlerdir. Daha sonrasında ise parça sürüşü optimizasyonu (PSO) geliştirmişlerdir. Zhang vd. [25], çalışmalarında ZB_ ARP ve ETD_ ARP problemleri için TA ve Karınca Kolonisi Optimizasyonunu (KKO) bütünleşik olarak kullanmışlardır. Bütünleşik algoritmanın bulduğu sonuçları KKO ve TA algoritmalarının çözümleriyle karşılaştırmışlar ve çözümlerinin daha iyi olduklarını raporlamışlardır. Johar vd. [26], yaptıkları çalışmada ZB_ ARP için DKA ve TA algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri sezgiselleri literatürdeki test problemleri ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma sonucunda DKA algoritmasının daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Gendreau vd. [27] 2015 yılında ZB_ ARP için bir literatür taraması yayınlamışlardır. Daha ayrıntılı bilgi için bu çalışmadan yararlanılabilir. Wang [28] ise araç rotalama problemi için toplam tamamlanma süresinin enazlandığı çalışmaları ve bunlarla ilgili geliştirilen çözüm yöntemlerini ele almıştır.

Huang vd. [29] 2017 yılında yapmış oldukları çalışmada zaman bağımlı araç rotalama problemiyle birlikte esnek yol durumunu da göz önüne almışlardır. Bir müşteriden diğer bir müşteriye birden fazla yol seçeneği mevcuttur. Bu nedenle, kararlar yalnızca rotalama kararını değil aynı zamanda müşterilerin kalkış sürelerine ve trafiğin durumuna bağlı olarak yol seçimi kararını da içermektedir.

Rincon Garcia vd. [30] yapmış oldukları çalışmada geniş komşu arama (Large neighbourhood search) ve değişken komşu arama tekniklerini kullanmışlardır. Birinci aşamada, geniş komşu arama ile zaman penceresi ihlallerinden kaynaklanan cezaları düşürerek araç sayısı azaltmaya çalışılmaktadır. İkinci aşamada ise toplam mesafe ve toplam seyahat süresi en aza indirilir. Literatürdeki test problemleriyle sonuçlar karşılaştırıldığında, önerdikleri algoritmanın makul sürede önceki uygulamalara kıyasla araç

sayısında (%4,15), seyahat mesafesinde (%10,88) ve seyahat süresinde (%12,00) bir düşüş sağlayabildiğini göstermişlerdir. Spliet vd. [31] 2017 yılında yayınlamış oldukları çalışmada zaman bağımlı araç rotalama problemini zaman penceresi ile birlikte ele almışlardır. Amaç, zaman pencerelerini, beklenen taşıma maliyetlerini en aza indirecek şekilde atama yapmaktır. Dünyadaki kaynakların giderek azalması buna bağlı olarak insanların geri dönüşüm konusunda bilinçlenmesi ile birlikte günümüz lojistik faaliyetlerinin önemli bir unsuru da müşterilerden işletmelere gerçekleştirilen mal taşımacılığıdır. Tesislerden müşterilere yapılacak taşıma işlemleri ile birlikte müşterilerden tesislere toplama işlemlerinin de aynı araçlarla gerçekleştirildiği problemler olarak tanımlanan Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (TD_ ARP), son yıllarda üzerinde çeşitli çalışmaların yapıldığı bir problem türü olmuştur. TD_ ARP'de bütün talepler ya depodan müşteriye ulaştırılmakta ya da müşteriden depoya taşınmaktadır. TD_ ARP'nin 3 farklı türü bulunmaktadır. Bunlar;

1.1. Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemi (ÖDST_ ARP)

(Vehicle Routing Problem with Backhauls)

Bu problemde müşteriler dağıtım (linehaul) ve toplama (backhaul) müşterileri olmak üzere iki gruba ayrılır. Araçların dağıtım planının önce dağıtım yapılacak olan müşterilere daha sonra toplama yapılacak müşterilere uğrayıp depoya dönecek şekilde yapılması ÖDST_ ARP olarak adlandırılabilir [32]. Her grup yalnızca dağıtım veya yalnızca toplama müşterilerinden oluşmalıdır. Her rotada eğer varsa toplama yapılacak müşterilere, dağıtım yapılacak müşterilere uğrandıktan sonra uğranılmalıdır. Ana depolardan marketlere sebze-meyve dağıtımından sonra üreticilerden yeni ürünlerin depoya taşınması bu problem tipine örnek olarak verilebilir.

1.2. Karma Topla- Dağıt Araç Rotalama Problemi (KTD_ ARP)

(Vehicle Routing Problem with Mixed Pick-up and Delivery)

ÖDST_ ARP'de müşteri öncelikleriyle ilgili yapılan varsayımın kaldırılması ile elde edilen problem tipidir. Yani her rotada, öncelik olmaksızın dağıtım ve toplama müşterileri istenilen sırada karışık olarak ziyaret edilebilir. Araç içerisinde yeniden yüklemenin mümkün olduğu durum için geçerli bir problem tipidir. Hizmet sektöründe, depodan müşterilere kargolar dağıtılırken diğer müşterilerden depoya götürölmek üzere kargoların toplanması; sağlık sektöründe, kanların merkezlerden hastanelere dağıtımı esnasında toplama kamplarından merkeze yeni kanların götürölmesi bu problem tipine örnek olarak verilebilir.

1.3. Eş Zamanlı Topla- Dağıt Araç Rotalama Problemi (ETD_ ARP)

(Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery)

TD_ ARP'nin daha önce bahsedilen iki türünde müşteriler ya toplama ya da dağıtım müşterisi olabilmekteyken, ETD_ ARP'de ise müşteriler aynı anda hem dağıtım hem de

toplama müşteriye olabilirler. Böyle bir durumda araç müşteriye önce verilecek ürünü bırakmakta daha sonra toplanacak ürünü almaktadır. Gıda sektöründe, içeceklerin marketlere bırakıldıktan sonra aynı marketten boş şişelerin geri dönüşüm amaçlı toplanması [33]; otomotiv sektöründe, yedek parçaların bölge bayilerine dağıtım esnasında kullanılmış parçaların geri dönüşüm için fabrikalara geri gönderilmesi bu problem tipine örnek olarak verilebilir.

Tanımlarından da anlaşılacağı gibi ETD_ ARP, ÖDST_ ARP ve KTD_ ARP'nin genel halidir. Dolayısıyla, ETD_ ARP için geliştirilen bir matematiksel model, doğrudan ya da küçük değişiklikler ile ÖDST_ ARP ve KTD_ ARP için kullanılabilir [34].

ETD_ ARP için yapılan ilk çalışma 1989 yılında Min [35] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada ETD_ ARP için bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiş ve Ohio'daki bir halk kütüphanesi dağıtım sisteminde uygulanmıştır. Sonuçta, önemli zaman / mesafe tasarruflarının sağlanabileceği gösterilmiştir. Halse [36] değişik araç rotalama problemleri için Bender ayrıştırmasına dayanan bir metod geliştirmişlerdir. Bu metodun alt problemleri kolon üretimi kullanılarak çözülmüştür. Yöntem, standart küme-bölme modeli için bir kolon üretimi yaklaşımı ile karşılaştırılmıştır. Dethloff [37], ETD_ ARP'nin diğer araç rotalama problemleri ile olan ilişkisini araştırmıştır. Sezgisel bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen algoritma, literatürdeki test problemlerinin yanı sıra gerçek hayat problemine de uygulanmıştır. Nagy ve Salhi [38], TD_ ARP için bir sezgisel yöntem geliştirmiş, geliştirdikleri bu yöntemi depo sayısının tek ya da çok olmasına göre de analiz etmişlerdir. Crispim ve Brandao [39] bu problemi çözmek için reaktif tabu arama (RTA) ve değişken komşu iniş (DKİ) algoritması önermişlerdir. Önerilen algoritmalar ile elde edilen sonuçları literatürde mevcut olan sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Chen ve Wu [40] 2006 yılında yapmış oldukları çalışmada TD_ ARP için ekleme tabanlı bir sezgisel önermişlerdir. Elde ettikleri sonuçların şimdiye kadar ki sonuçlardan daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir. Montané ve Galvao [41] problemin çözümü için TA algoritması geliştirmişlerdir. Sonuçlar, 50 ile 400 müşterilik 87 test problemi üzerinde test edilmiştir. Ropke ve Pisinger [33] literatürdeki mevcut çalışmaları göz önüne alarak bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmalarında zaman penceresini de göz önüne almışlardır. Geliştirilen sezgisel, literatürdeki 338 problem üzerinde test edilmiş ve bunların 227'sinde bilinen en iyi sonuçlardan daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bianchessi ve Righini [42] yaptıkları çalışmada, bu problem için kurucu sezgisel, yerel arama algoritması ve tabu arama algoritmasını ele alarak karşılaştırmışlardır. Ai ve Kachitvichyanukul [43] 2009 yılında yapmış oldukları çalışmada bu problemin çözümü için matematiksel model ve kuş sürüsü optimizasyonu algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirilen matematiksel model literatürde mevcut olan matematiksel modellerin genelleştirilmiş halidir. Zachariadis vd. [44] TA ve yönlendirilmiş yerel arama algoritmalarını bir arada kullandıkları bir metasezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntem 50 ile 400

müşteriden oluşan test problemlerinde test edilmiştir. Literatürde bilinen en iyi çözümlerden bir kaçında daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Gajjal ve Abad [45] problem için karınca kolonisi algoritması (KKA) geliştirmişlerdir. Literatürde mevcut olan test problemleri üzerinde kapsamlı bir deney gerçekleştirmişlerdir. KKA'nın mevcut algoritmalara kıyasla iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur. Zachariadis vd. [46] 2010 yılında yapmış oldukları çalışmalarında arama alanını çözüm alanının çeşitli bölgelerine yönlendirmek için yenilikçi bir bellek mekanizması kullanmaktadır. Geliştirilen yöntem 50 ile 400 müşteriden oluşan çok sayıda test problemi üzerinde test edilmiştir. Sınırlı bir hesaplama gerektiren yüksek kaliteli çözümler ürettiği için oldukça etkili olduğu belirtilirken, birkaç yeni en iyi çözümü üretmeyi başarmışlardır. Subramanian vd. [47] bir paralel algoritma geliştirmişlerdir. Paralel algoritma, yinelemeli bir yerel arama algoritmasına entegre edilmiş, değişken komşu sıralamasına sahip çok başlangıçlı bir sezgisel yöntem olarak ele alınmıştır. Zachariadis ve Kiranoudis [48] yapmış oldukları çalışmada yerel arama algoritmasını kullanan bir tabu arama algoritması geliştirmişlerdir. Literatürde mevcut olan test problemlerinin 18'inde geliştirdikleri algoritmayı test etmişler ve daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Fan [49] yapmış olduğu çalışmada TD_ ARP için zaman penceresini ve müşteri memnuniyetini de içerecek şekilde yeni bir algoritma geliştirmiştir. Müşteri memnuniyeti ile bekleme süresi ters orantılıdır. Subramanian vd. [47] problem için kısıtların gevşetildiği bir dal kesme algoritması geliştirmişlerdir. Algoritma, 87 adet test problemi ve 50 ile 200 müşteri aralığında test edilmiş, daha düşük alt sınırlar ve yeni optimal çözümler bulunmuştur. Wang ve Chen [50] zaman penceresini de göz önüne aldıkları çalışmalarında karma tamsayı matematiksel model ve genetik algoritma geliştirmişlerdir. Matematiksel model ile ilgili herhangi bir sayısal sonuç yoktur. Genetik algoritma için literatürde mevcut olan test problemleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Tasan ve Gen [51] TD_ ARP için genetik algoritma geliştirmişler ve test problemleri üzerinde test etmişlerdir. Zachariadis ve Kiranoudis [52] yerel arama algoritması ile tabu arama algoritmasının kullanıldığı bir metesezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritmayı literatürde mevcut olan test problemlerinde değerlendirmişlerdir. Göksal vd. [53] değişken komşu iniş algoritmasını da kullandıkları kuş sürüsü optimizasyonu çözüm yöntemini ele almışlardır. Geliştirilen algoritma test problemlerine uygulanmış ve literatürde mevcut olan problemlerden 104 adedinde eniyi çözümleri geliştirmiştir. Liu vd. [54] evde bakım hizmetleri uygulamalarını ele almışlardır. Hastaneden ya da ilaç depolarından ilaçların hastalara iletilmesi, tıbbi bakım cihazlarının hastalara ya da hastanelere götürülmesi ve kullanılmayan ilaçların hastalardan geri toplanması gibi süreçleri içermektedir. Problem için Genetik Algoritma ve Tabu Arama algoritması geliştirmişler ve algoritmaları mevcut test problemleri üzerinde değerlendirmişlerdir. Reil vd. [55] 2018 yılında yayınlamış oldukları çalışmada topla dağıt araç rotalama probleminin her üç türünü ve zaman pencereci araç rotalama problemini ele almıştır. Problemin çözümü için iki aşamalı

bir yaklaşım önermişlerdir. Birinci aşamada ürünlerin paketlenmesi ve taşınması sürecini kapsayan bir tabu arama algoritması geliştirilmiştir. İkinci aşamada ise araç sayısını enazlamak için çok başlangıçlı evrimsel strateji (multi-start evolutionary strategy) stratejisi kullanılırken toplam rotayı enazlamak için yine tabu arama algoritması kullanılmıştır.

ETD_ARD hakkında son yıllarda pek fazla çalışma mevcut değildir. Son yıllarda yapılan çalışmalar daha çok ÖDST_ARD ile ilgili çalışmalardır. TD_ARD hakkında daha geniş bilgi almak için Koç ve Laporte [56] tarafından yayınlanan literatür taraması gözden geçirilebilir.

Hem ZB_ARD hem de TD_ARD problemleri için yapılan çalışmalar incelendiği zaman çalışmaların çok büyük bir kısmının sezgisel yöntemleri ele aldığı görülmektedir. Ayrıca literatürde bu iki problem birlikte ele alındığı bir çalışmaya da rastlanmamıştır. Bu çalışmada TD_ARD'nin en genel hali olan Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (ETD_ARD) ile ZB_ARD'nin birlikte ele alındığı problem olan Zaman Bağımlı Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (ZB_ETD_ARD) incelenmiştir. Bu problem için zamana bağlı hız fonksiyonu özelliği kullanılarak, müşterilerden eş zamanlı olarak toplama ve dağıtım yapılmasına olanak sağlayan, kesin hesaplama gerçekleştiren, doğrusal yapıya sahip bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen bu model literatürdeki test problemleri üzerinde denenerek elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Çalışmanın bundan sonraki bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde problem tanımı ve geliştirilen matematiksel model sunulmuştur. Üçüncü bölümde, literatürdeki mevcut test problemleri ile deneysel çalışmalar yapılmış ve yorumlanmıştır. Dördüncü bölüm de ise çalışmadan elde edilen sonuçlar paylaşılmaktadır.

2. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL (PROBLEM DEFINITION AND MATHEMATICAL MODEL)

ZB_ETD_ARD notasyonol olarak şu şekilde tanımlanabilir: $G = (N, A)$ tam bağlı bir şebeke olsun. Burada N tüm düğümler kümesini $N = ("0" \cup N_C)$, "0" depo düğümler kümesini, N_C müşteri kümesini ve A düğümler arasındaki hatları tanımlamaktadır. Her bir düğüm çiftinin aralarındaki uzaklık d_{ij} ile tanımlanmıştır ($\forall i, j \in N$). q_i ve p_i ise sırasıyla i düğümler kümesinin dağıtım ve toplama taleplerini göstermektedir ($\forall i \in N_C$). Planlama periyodu ise K ile gösterilen ve aynı genişlikte olma zorunluluğu olmayan zaman dilimlerine ayrıştırılmış olup her bir zaman dilimi için LB_k ve UB_k sırasıyla, k . zaman diliminin başladığı ve bittiği zamanı ifade etmektedir ($\forall k \in K$). h_{kij} ise k . zaman dilimi içerisinde i düğümler kümesinden j düğümler kümesine seyahat hızını göstermektedir ($\forall i, j \in N; \forall k \in K$). Depoda homojen kapasiteye sahip (Q) sınırsız sayıda araç bulunmaktadır. Bir araç herhangi bir müşteriye hizmet götürdüğu zaman yalnızca s_i ile ifade

edilen bir servis süresi boyunca müşteride beklemek zorundadır. Bu süre aracın park edilmesi, yükleme ve boşaltma zamanlarını kapsamaktadır.

ZB_ETD_ARD tanımlanan bu şebeke üzerinde aşağıdaki varsayımlar altında enküçük maliyetli rotaların tespiti problemidir.

- Her müşteriye mutlaka bir kere uğranmalı,
- Bir rota depoda başlamalı ve yine depoda son bulmalı,
- Rota üzerindeki müşterilerin dağıtım ve toplama talepleri toplamı araç kapasitesini geçmemeli,
- Ulaşım süresi, gün içerisindeki zaman dilimlerine ve düğümler arasındaki uzaklığa bağlı olmalıdır.

Önerilen karma tamsayılı doğrusal programlama modelinde kullanılan karar değişkenleri aşağıdaki gibidir.

İkili Karar Değişkenleri (Binary Variables)

$$x_{ij} : \begin{cases} 1 & \text{eğer araç } i \text{ düğümler kümesinden } j \\ & \text{düğümler kümesine geçiyorsa } (\forall i, j \in N) \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$y_{ijkl} : \begin{cases} 1 & \text{eğer araç } i \text{ düğümler kümesinden } k \text{ zaman diliminde} \\ & \text{çıkıp } j \text{ düğümler kümesine } l \text{ zaman diliminde} \\ & \text{variyorsa } (\forall i, j \in N; \forall k, l \in K; l \geq k) \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Ek Karar Değişkenleri (Additional Decision Variables)

- u_i : i düğümler kümesine girmeden hemen önce araç üzerindeki dağıtılacak ürün miktarı ($\forall i \in N_C$)
- v_i : i düğümler kümesinin çıkışında araçta toplanan ürün miktarı ($\forall i \in N_C$)
- T_i^+ : aracın i düğümler kümesine giriş zamanı ($\forall i \in N_C$)
- T_i^- : aracın i düğümler kümesinden çıkış zamanı ($\forall i \in N$)
- $T0_i^+$: eğer araç i düğümler kümesinden depoya dönüş yapıyorsa, rotanın depoya dönüş zamanı, aksi halde "0" ($\forall i \in N_C$)
- TT_{ij} : i düğümler kümesinden j düğümler kümesine geçiş süresi ($\forall i, j \in N$)

3.1. Matematiksel model (Mathematical Model)

Bu bölümde Koç ve Karaoğlan [1] tarafından ZB_ARD için geliştirilmiş olan matematiksel model ve toplama ve dağıtımın eş zamanlı olarak yapıldığı durum da göz önüne alınarak yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Geliştirilen matematiksel model doğrusal yapıya sahip yeni bir karma tamsayılı matematiksel model olarak sunulmuştur.

Amaç Fonksiyonu (Objective Function)

$$\text{En küçük } Z = \sum_{i,j \in N} TT_{ij} \quad (1)$$

Kısıtlar (Constraints)

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

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = \sum_{j \in N} x_{ji} \quad (\forall i \in N) \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in K} y_{ijkl} = x_{ij} \quad (\forall i, j \in N) \quad (4)$$

$$u_j - u_i + Qx_{ij} + (Q - q_i - q_j)x_{ji} \leq Q - q_i \quad (\forall i, j \in N_c; i \neq j) \quad (5)$$

$$v_j - v_i + Qx_{ij} + (Q - p_i - p_j)x_{ji} \leq Q - p_j \quad (\forall i, j \in N_c; i \neq j) \quad (6)$$

$$u_i \geq q_i + \sum_{j \in N_c, j \neq i} q_j x_{ij} \quad (\forall i \in N_c) \quad (7)$$

$$u_i + v_i - q_i \leq Q \quad (\forall i \in N_c) \quad (8)$$

$$u_i \leq Q - (Q - q_i)x_{i0} \quad (\forall i \in N_c) \quad (9)$$

$$v_i \geq p_i + \sum_{j \in N_c, j \neq i} p_j x_{ji} \quad (\forall i \in N_c) \quad (10)$$

$$v_i \leq Q - (Q - p_i)x_{0i} \quad (\forall i \in N_c) \quad (11)$$

$$TT_{ij} \leq T_j^+ - T_i^- + M(1 - x_{ij}) \quad (\forall i \in N; \forall j \in N_c) \quad (12)$$

$$TT_{ij} \geq T_j^+ - T_i^- + M(x_{ij} - 1) \quad (\forall i \in N; \forall j \in N_c) \quad (13)$$

$$TT_{j0} \leq T_0^+ - T_j^- + M(1 - x_{j0}) \quad (\forall j \in N_c) \quad (14)$$

$$TT_{j0} \geq T_0^+ - T_j^- + M(x_{j0} - 1) \quad (\forall j \in N_c) \quad (15)$$

$$d_{ij} - M(2 - x_{ij} - y_{ijkk}) \leq (T_j^+ - T_i^-)h_{kij} \quad (\forall i \in N; \forall j \in N_c; \forall k \in K) \quad (16)$$

$$d_{ij} - M(2 - x_{ij} - y_{ijkl}) \leq (UB_k - T_i^-)h_{kij} + \sum_{k < m < l} (UB_m - LB_m)h_{mij} + (T_j^+ - LB_l)h_{lij} \quad (\forall i \in N; \forall j \in N_c; \forall k, l \in K) \quad (17)$$

$l > k$

$$d_{j0} - M(2 - x_{j0} - y_{j0kk}) \leq (T_0^+ - T_j^-)h_{kj0} \quad (\forall j \in N_c, \forall k \in K) \quad (18)$$

$$d_{j0} - M(2 - x_{j0} - y_{j0kl}) \leq (UB_k - T_j^-)h_{kj0} + \sum_{k < m < l} (UB_m - LB_m)h_{mj0} + (T_0^+ - LB_l)h_{lj0} \quad (\forall j \in N_c; \forall k, l \in K; l > k) \quad (19)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k, l \in K} y_{ijkl} UB_k \geq T_i^- \quad (\forall i \in N_c) \quad (20)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k, l \in K} y_{ijkl} LB_k \leq T_i^- \quad (\forall i \in N_c) \quad (21)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k, l \in K} y_{ijkl} UB_l \geq T_i^+ \quad (\forall i \in N_c) \quad (22)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k, l \in K} y_{ijkl} LB_l \leq T_i^+ \quad (23)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k, l \in K} y_{i0kl} UB_l \geq T_0^+ \quad (\forall i \in N_c) \quad (24)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k, l \in K} y_{i0kl} LB_l \leq T_0^+ \quad (\forall i \in N_c) \quad (25)$$

$$T_i^- = T_i^+ + s_i \quad (\forall i \in N_c) \quad (26)$$

$$x_{ij}, y_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad (\forall i, j \in N; \forall k, l \in K) \quad (27)$$

$$u_i, v_i, T_i^+, T_i^-, T_0^+ \geq 0 \quad (\forall i \in N_c) \quad (28)$$

$$TT_{ij} \geq 0 \quad (\forall i, j \in N) \quad (29)$$

Geçerli Eşitsizlikler (Valid Inequalities)

$$TT_{ij} \geq (d_{ij} / h_{kij}) y_{ijkk} \quad (\forall i, j \in N; i \neq j; \forall k \in K) \quad (30)$$

$$TT_{ij} \geq \sum_{k, l \in K} (d_{ij} / \max_{k \leq m \leq l} \{h_{mij}\}) y_{ijkl} \quad (\forall i, j \in N; i \neq j) \quad (31)$$

$$\sum_{i \in N_c} x_{0i} \geq \max \left\{ \left\lceil \frac{\sum_{i \in N_c} q_i}{Q} \right\rceil, \left\lceil \frac{\sum_{i \in N_c} p_i}{Q} \right\rceil \right\} \quad (32)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k, m \in K} my_{ijkm} - \sum_{i \in N} \sum_{l, m \in K} my_{jiml} \leq 0 \quad (\forall j \in N_c) \quad (33)$$

Matematiksel modelde amaç fonksiyonu (Eş. 1) numaralı eşitlik ile belirtilmiştir. Amaç toplam rota süresinin enküçüklenmesidir. (Eş. 2, Eş. 3) numaralı kısıtlar genel atama kısıtlarıdır. Her müşteriye mutlaka bir kere hizmet verilmesini garantilemek için ayrıca düğümlerdeki girdi çıktı dengesini sağlamaktadır. (Eş. 4) numaralı kısıt her hat için, hattın kullanıldığı durumda, aracın bir zaman diliminde seyahate başlamasını ve aynı ya da daha büyük bir zaman diliminde seyahatini bitirmesini garantilemektedir.

(Eş. 5, Eş. 11) numaralı kısıtlar MTZ (Miller-Tucker-Zemlin) olarak bilinen kapasite ve alt tur eleme kısıtlarıdır. Bu kısıtlar ilk olarak Gezgin Satıcı Problemi (GSP) için

Miller vd. [57] tarafından geliştirilmiş, Kulkarni ve Bhawe [58] tarafından ARP'ye uyarlanmıştır. (Eş. 5, Eş. 6) numaralı kısıtlar bir rota üzerinde sırasıyla dağıtım ve toplama taleplerinin toplamalarının kapasiteyi geçmemesini garanti etmekle beraber alt turların oluşmasını da engellemektedir. (Eş. 7, Eş. 11) numaralı kısıtlar yardımcı karar değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını belirlemektedirler.

(Eş. 12, Eş. 15) numaralı kısıtlar aracın düğümlere giriş ve çıkış zamanının, düğümler arası geçiş süreleri ile bağlantılı olmasını sağlamaktadır. (Eş. 12, Eş. 13) numaralı kısıtlar düğümlerden müşterilere giriş, (Eş. 14, Eş. 15) numaralı kısıtlar ise müşterilerden depoya dönüş sürelerini belirleyen kısıtlardır. (Eş. 16, Eş. 19) numaralı kısıtlar, sadece ardışık zaman dilimleri için değil ardışık olmayan zaman dilimleri için de zaman dilimleri arasındaki geçişlerin araç hızı ve kat edilen mesafeye bağlı olmasını sağlamaktadır. (Eş. 16) numaralı kısıt aracın bir düğümden k zaman diliminde çıkıp aynı zaman diliminde bir sonraki müşteriye giriş yaptığı, (Eş. 17) numaralı kısıt ise aracın düğümden k zaman diliminde çıkarak daha büyük bir l zaman diliminde bir sonraki müşteriye giriş yaptığı durumu belirten kısıtlardır. (Eş. 18) numaralı kısıt aracın k zaman diliminde müşteriden çıkıp aynı zaman diliminde depoya dönüşünü, (Eş. 19) numaralı kısıt ise aracın k zaman diliminde müşteriden çıkıp daha büyük bir l zaman diliminde depoya dönüşünü sağlamaktadır. (Eş. 20, Eş. 23) numaralı kısıtlarda zaman dilimlerinin alt ve üst sınırlarının, aracın müşterilerden tüm düğümlere giriş ve tüm düğümlerden çıkış zamanlarıyla bağlantılı olmasını, (Eş. 24, Eş. 25) numaralı kısıtlar ise zaman dilimlerinin alt ve üst sınırlarının aracın müşteriden depoya dönüşü ile bağlantılı olmasını sağlamaktadır. (Eş. 26) numaralı kısıtta, aracın müşteriden çıkış zamanının, aracın müşteriye giriş zamanı ve müşteriye geçirdiği servis zamanının toplam süresine eşit olması garantilenmektedir. (Eş. 27, Eş. 29) numaralı kısıtlar ise işaret kısıtlardır.

(Eş. 30, Eş. 33) numaralı kısıtlar ise, önerilen matematiksel modele eklenen geçerli eşitsizliklerdir. Bu eşitsizlikler, çözüm süresini kısaltmak için, matematiksel modellerdeki işaret kısıtlarının gevşetilmesi ile elde edilen doğrusal modelin çözümü ile elde edilen çözümü (alt sınır) eniyi çözüme yaklaştırmak amacıyla kullanılmaktadır. Normal şartlar altında mevcut matematiksel modelin eniyi çözüme ulaşmasında herhangi bir etkisi olmayan bu kısıtlar, doğrusal gevşetme ile anlamlı hale gelmektedir. Geçerli eşitsizlikler, geliştirilen kesin algoritmalarda bazı kesirli ve eniyi olmayan çözümlerin çözüm uzayından atılmasında oldukça etkin matematiksel ifadelerdir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (COMPUTATIONAL RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bir önceki bölümde önerilen matematiksel modelin etkinliğini araştırmak amacıyla Solomon'un [59] 25 müşterilik test kümesi ve Ichoua vd. [8] tarafından kullanılan seyahat hızı matrisi göz önüne alınarak ZB_ETD_ARP için toplamda 112 adet yeni test problemi üretilmiştir. Bu test kümesinde müşteriler [100x100]'lük yüzey üzerinde değişik

yerleşim parametrelerine göre yerleştirilmiştir. Altı farklı problem tipi tanımlanmıştır; $R_1, R_2, C_1, C_2, RC_1, RC_2$.

Bu parametrelere göre R tipi problemlerde müşteriler tamamen rassal, C tipi problemlerde müşteriler belirli bölgelerde kümelenmiş, RC tipi problemlerde ise müşterilerin bir kısmı rassal kalan kısmı ise belirli bölgelerde kümelenmiş şekilde yerleştirilmiştir. 1. ve 2. tip problemler ise dağıtım ve toplama taleplerinin Angelelli ve Mansini [60] tarafından önerilen talep ayırma yöntemine göre oluşturulmuştur. Ayrılmış orijinal talep değerleri dağıtım talebi olarak kabul edilmekte, toplama talebi ise müşteri numarasının tek ya da çift olmasına göre değişmektedir. Eğer i çift ise $p_i = [(1 - \gamma)q_i]$, eğer i tek ise $p_i = [(1 + \gamma)q_i]$ olarak kabul edilmiştir. Bu ayırma işlemlerinde $\gamma = 0,2$ olduğu durum 1. tip problem $\gamma = 0,8$ ise 2. tip problem olarak alınmıştır.

Seyahat hızları düşük, orta ve yüksek hızda olmak üzere üç kategoride tanımlanmıştır. Bir iş günü üç zaman dilimine bölünmüş ve her zaman dilimine rassal olarak bir araç hız değeri atanmıştır.

Performans ölçütü olarak Yüzde Sapma Değeri (YSD) kullanılmıştır. Bu değer, matematiksel modelden elde edilen üst sınırın (Z^{US}), yine matematiksel modelden elde edilen alt sınırdan (Z^{AS}) uzaklığını göstermektedir. Bu değer "0" a ne kadar yakın olursa elde edilen sonuç eniyi çözüme o kadar yakın olmaktadır. YSD değeri şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$YSD = 100 * \left(\frac{Z^{US} - Z^{AS}}{Z^{US}} \right)$$

Önerilen matematiksel model "GAMS" ara yüzünde kodlanmış ve matematiksel model çözücüsü olarak "CPLEX 10,2" kullanılmıştır. Bütün koşullarda çözücünün varsayılan parametre seviyeleri kullanılmıştır. Her bir koşul "Intel Xeon E5-1650 (6 Core) 3,2 Ghz" hızında "16 GB" ara belleğe sahip, "Windows 7" işletim sistemi ile çalışan bilgisayarlarda gerçekleştirilmiştir. Bütün koşullar 1 saat (3600 saniye) çözüm süresi ile sınırlandırılmıştır.

3.1. Deneysel sonuçlar (Computational Results)

Deneysel çalışmalara göre elde edilen genel sonuçlar Tablo 6'da sırasıyla $R_1, R_2, C_1, C_2, RC_1, RC_2$ tipi test problemleri için sunulmaktadır. Bu tablolarda ilk sütun problem adını, ikinci ve üçüncü sütunlar matematiksel model çözücüsünden elde edilen üst ve alt sınırı, son sütun ise sırasıyla Yüzde Sapma Değeri (YSD)'ni göstermektedir.

Tablo 1'de sunulan sonuçlara göre; müşterilerin belirli bir bölgede kümelendiği ve toplama taleplerinin $\gamma = 0.2$ değeri kullanılarak elde edildiği C_1 tipi 17 test probleminde ortalama YSD %26,81 olarak elde edilmiştir. Bu test kümesi içerisinde en iyi çözüme ulaşılan problem olmamıştır.

Tablo 2'ye göre ise $\gamma = 0.8$ değerine göre elde edilen toplama talepleri kullanılarak oluşturulan C_2 tipi için YSD değeri %30,59 olarak belirlenmiştir. C_1 tipi problemlerde

elde edilen sonuçlar C_2 tipinde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında C_1 tipi problemlerde daha düşük YSD elde edilmiştir.

Tablo 1. C_1 tipi test problemlerinin sonuçları
(Results of C_1 type test problems)

Problem Adı	Üst Sınır	Alt Sınır	YSD
C101_1	185,95	159,74	14,10
C102_1	216,49	144,68	33,17
C103_1	238,51	144,04	39,61
C104_1	211,24	152,73	27,70
C105_1	239,79	153,72	35,89
C106_1	199,04	163,22	18,00
C107_1	191,86	139,91	27,08
C108_1	194,24	142,87	26,45
C109_1	245,81	149,73	39,09
C201_1	291,77	205,26	29,65
C202_1	281,28	208,93	25,72
C203_1	297,32	205,76	30,80
C204_1	271,68	211,06	22,31
C205_1	283	213,5	24,56
C206_1	269,11	225,49	16,21
C207_1	281,22	217,3	22,73
C208_1	269,95	208,66	22,70
Ortalama	245,19	179,21	26,81

Tablo 2. C_2 tipi test problemlerinin sonuçları
(Results of C_2 type test problems)

Problem Adı	Üst Sınır	Alt Sınır	YSD
C101_2	259,38	147,28	43,22
C102_2	235,59	142,76	39,40
C103_2	199,15	144,51	27,44
C104_2	199,64	158,28	20,72
C105_2	262,55	151,7	42,22
C106_2	198,52	162,85	17,97
C107_2	200,69	142,7	28,90
C108_2	187,12	145,65	22,16
C109_2	287,92	149,56	48,06
C201_2	339,45	203,05	40,18
C202_2	291,15	204,3	29,83
C203_2	290,48	208,93	28,07
C204_2	270,65	211,63	21,81
C205_2	289,46	213,73	26,16
C206_2	286,61	217,81	24,00
C207_2	314,14	215,37	31,44
C208_2	292,08	208,91	28,48
Ortalama	259,09	178,18	30,59

Tablo 3'e göre müşterilerin tamamen rassal olarak yerleşiminin yapıldığı R_1 tipi 23 problem için YSD değeri %16,17 olarak hesaplanmıştır. R_1 tipi problem için de eniyi sonuç bulunamamıştır. R_1 tipi problemlerde elde edilen YSD, C_1 tipi problemlerde elde edilen değerlere göre daha düşüktür.

Tablo 4'e göre R_2 tipi problem için YSD değeri %16,67 olarak hesaplanmıştır. R_2 tipi problem için de eniyi sonuç bulunamamıştır. R_1 tipi problem ile R_2 tip problemlerin

birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenirken, R_1 tipi problem için daha düşük YSD elde edilmiştir.

Tablo 3. R_1 tipi test problemlerinin sonuçları
(Results of R_1 type test problems)

Problem Adı	Üst Sınır	Alt Sınır	YSD
R101_1	415,62	339,8	18,24
R102_1	462,17	340,05	26,42
R103_1	374,05	322,36	13,82
R104_1	411,05	324,27	21,11
R105_1	399,94	330,13	17,46
R106_1	431,57	327,95	24,01
R107_1	430,68	318,63	26,02
R108_1	445,64	340,86	23,51
R109_1	373,38	328,28	12,08
R110_1	433,55	318,72	26,49
R111_1	372,91	331,71	11,05
R112_1	418,76	327,58	21,77
R201_1	361,66	329,98	8,76
R202_1	370,79	316,69	14,59
R203_1	342,91	322,8	5,86
R204_1	362,97	331,51	8,67
R205_1	398,63	336,25	15,65
R206_1	389,2	325,54	16,36
R207_1	345,67	332,87	3,70
R208_1	439,09	329,23	25,02
R209_1	370,08	319,33	13,71
R210_1	354,38	322,33	9,04
R211_1	355,53	324,79	8,65
Ortalama	393,92	327,89	16,17

Tablo 4. R_2 tipi test problemlerinin sonuçları
(Results of R_2 type test problems)

Problem Adı	Üst Sınır	Alt Sınır	YSD
R101_2	431,61	336,18	22,11
R102_2	455,75	340,97	25,18
R103_2	379,35	321,95	15,13
R104_2	433,31	323,5	25,34
R105_2	365,29	332,03	9,11
R106_2	466,3	328,74	29,50
R107_2	368,58	319,68	13,27
R108_2	436,02	342,94	21,35
R109_2	383,18	328,9	14,17
R110_2	431,57	318,17	26,28
R111_2	366,75	333,86	8,97
R112_2	406,82	327,5	19,50
R201_2	385,26	327,94	14,88
R202_2	392,86	315,49	19,69
R203_2	336,82	322,35	4,30
R204_2	387,8	329,48	15,04
R205_2	404,61	337,61	16,56
R206_2	390,16	325,96	16,45
R207_2	371,22	329,89	11,13
R208_2	436,81	329,03	24,67
R209_2	356,94	321,37	9,97
R210_2	348,07	323,26	7,13
R211_2	375,3	324,23	13,61
Ortalama	396,10	327,87	16,67

Tablo 5'e göre müşterilerin bir kısmının rassal kalan kısmının ise belirli bölgelerde kümelenmiş Şekilde yerleştirildiği RC₁ tipi problem için YSD değeri %7,34 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca RC202_1, RC203_1, RC206_1 problemleri için optimal sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5. RC₁ tipi test problemlerinin sonuçları
(Results of RC₁ type test problems)

Problem Adı	st Sınır	Alt Sınır	YSD
RC101_1	273,63	264,90	3,19
RC102_1	291,80	260,38	10,77
RC103_1	299,09	266,95	10,75
RC104_1	309,74	268,72	13,24
RC105_1	296,40	271,53	8,39
RC106_1	301,94	278,93	7,62
RC107_1	298,41	265,15	11,15
RC108_1	273,31	260,56	4,67
RC201_1	329,09	266,88	18,90
RC202_1	284,02	284,02	0,00
RC203_1	267,48	267,48	0,00
RC204_1	300,60	285,36	5,07
RC205_1	291,55	263,53	9,61
RC206_1	273,72	273,72	0,00
RC207_1	288,21	260,04	9,77
RC208_1	274,06	262,19	4,33
Ortalama	290,82	268,77	7,34

Tablo 6. RC₂ tipi test problemlerinin sonuçları
(Results of RC₂ type test problems)

Problem Adı	st Sınır	Alt Sınır	YSD
RC101_2	333,85	262,84	21,27
RC102_2	340,53	261,89	23,09
RC103_2	346,58	263,64	23,93
RC104_2	370,19	267,06	27,86
RC105_2	364,17	269,98	25,86
RC106_2	379,70	275,79	27,37
RC107_2	362,96	260,17	28,32
RC108_2	360,29	249,62	30,72
RC201_2	350,03	265,66	24,10
RC202_2	379,60	271,21	28,55
RC203_2	355,07	258,38	27,23
RC204_2	391,92	270,17	31,07
RC205_2	338,74	264,44	21,93
RC206_2	352,34	257,55	26,90
RC207_2	333,66	257,19	22,92
RC208_2	364,91	257,76	29,36
Ortalama	357,78	263,33	26,28

Tablo 6'da sunulan sonuçlara göre; RC₂ tipi 16 test probleminde ortalama YSD %26,28 olarak elde edilmiştir. Problemlerin hiçbirisinde bir saat czm süresi kısıtı altında en iyi czme ulaşılamamıştır.

Ayrıca tüm tablolardaki sonuçlar değerlendirilecek olursa 1. tip problemlerdeki YSD değerleri 2. tipteki YSD değerlerinden daha düşük çıkmıştır. Bu sonuca dayanarak müşteriler için dağıtım ve toplama talepleri birbirine ne

kadar yakın olursa elde edilen czmlerin optimal czme o kadar yakın olduğu sonucu çıkarılabilir.

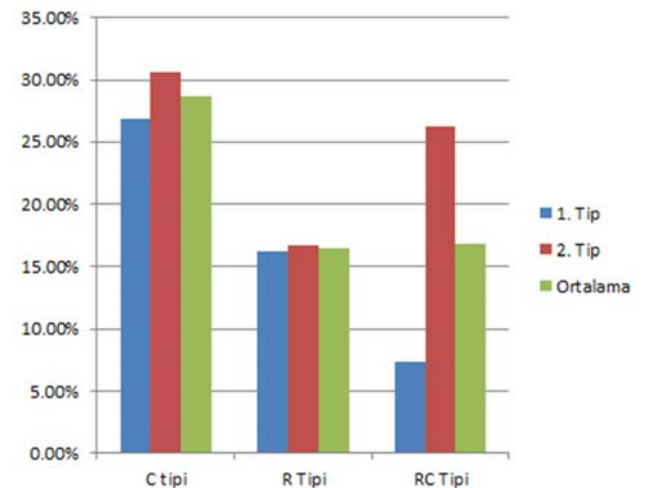
Tablo 7'de geliştirilen matematiksel model için geçerli eşişsizliklerin etkinliği gösterilmiştir. T(M1) olarak gösterilen sütün geçerli eşişsizliklerin var olduğu durumdaki YSD değerlerini T(M2) olarak gösterilen sütün ise modelde geçerli eşişsizliklerin olmadığı durumdaki YSD değerlerini göstermektedir.

Tablo 7. Problem tipleri için geçerli eşişsizliklerin etkinliği
(Efficiency of valid inequalities for problem types)

Problem Adı	st Sınır	YSD	
		T(M1)	T(M2)
C1	245,19	26,81	36,37
C2	259,09	30,59	39,35
R1	393,92	16,17	24,35
R2	396,10	16,67	24,78
RC1	290,82	7,34	16,67
RC2	357,78	26,28	32,28
Ortalama	323,82	20,64	28,97

Tablo 7'de görüldüğü gibi modele eklenen geçerli eşişsizlikler YSD değerlerinde yaklaşık %8 oranında bir düşüş meydana getirmiştir. Bu da matematiksel modelin performansına ciddi Şekilde katkılar sağlamaktadır.

Őekil 1'de C, R ve RC tipi problemlerin sonuç ortalamaları sunulmaktadır. Őekil 1'deki sonuçlara göre, en az R tipi problemlerde (%16,42) en fazla ise C tipi problemlerde (%28,7) YSD elde edilmiştir. 112 test probleminin genel ortalamasında ise %20,64'lk YSD elde edilmiştir.



Őekil 1. C, R ve RC tipi problemlerin sonuç ortalamaları
(Averages of C, R and RC type problems)

Toplam 112 adet problemde 3 adet problem için optimal sonuca ulaşılmıştır. Bu problemlerin uu de RC tipi problemlerdir. RC tipi problemlerde optimal sonuca ulaşılmasına rağmen YSD değerinin fazla olması problemin zorluğunu göstermektedir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmasında Zaman Bağımlı ARP ve Topla Dağıt ARP ayrıntılı olarak incelenerek tanımlanmış ve literatürde bu problem türleri için yapılmış çalışmalar kapsamlı bir şekilde araştırılarak her bir çalışmanın özellikleri detaylı olarak açıklanmıştır.

Daha sonra bu iki problemin birlikte ele alınması ile elde edilen ZB_ETD_ARP için, ilk olarak, zamana bağlı hız fonksiyonu özelliğini göz önüne alarak “ilk giren ilk çıkar (FIFO)” yaklaşımını sağlayan, doğrusal yapıya sahip ve kesin hesaplama gerçekleştiren bir karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Literatürde henüz çalışılmamış olan bu problemi test etmek için Solomon’un [59] 25 müşterilik test kümesi ve Ichoua vd. [8] tarafından kullanılan seyahat hızı matrisi göz önüne alınarak ZB_ETD_ARP için toplamda 112 tane yeni test problemi türetilmiştir. Test problemlerinin yalnızca 3 adedinde optimal sonuca ulaşılırken ortalama YSD %20,25 olarak hesaplanmıştır. Optimal sonuca ulaşılan 3 probleminde RC_7 tipinde olması bazı müşterilerin rassal bazı müşterilerin belli bölgelerde kümелendiđi durumların yerleşim açısından daha başarılı olduğu sonucunu vermektedir. 1. tip problemlerin YSD sonuçları ise 2. tip problemlere göre daha düşük çıkmıştır. Dolayısıyla dağıtım ve toplama talepleri birbirine ne kadar yakın ise elde edilen sonuç da o kadar iyi olacaktır.

NP-Zor sınıfında yer alan ve dolayısıyla çözümü oldukça zor olan ZB_ETD_ARP için önerilen matematiksel modeller ile orta ve büyük boyutlu problemlerde en iyi çözümlere ulaşmak mümkün değildir. Bu nedenle, daha sonraki çalışmalarda kısa sürelerde iyi çözümler sunacak sezgisel/meta-sezgisel yöntemler geliştirilebilir. Sonraki aşamada, en iyi çözümleri elde edebilmek amacıyla, önerilen matematiksel model, sezgisel yöntem ve geçerli eşitsizlikler (valid inequalities) yardımıyla bir kesin algoritma geliştirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Koç, Ç. and I. Karaoğlan, A mathematical model for the time-dependent vehicle routing problem. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (3), 549-55, 2014.
- Malandraki, C., Time dependent vehicle routing problem: Formulations, solution algorithms and computations experiments. Northwestern University. USA., 1989.
- Malandraki, C. and M.S. Daskin, Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms. Transportation Science, 26 (3), 185-200, 1992.
- Hill, A.V. and W.C. Benton, Modelling Intra-City Time-Dependent Travel Speeds for Vehicle Scheduling Problems. The Journal of the Operational Research Society, 43 (4), 343-351, 1992.
- Malandraki, C. and R.B. Dial, A restricted dynamic programming heuristic algorithm for the time dependent traveling salesman problem. European Journal of Operational Research, 90 (1), 45-55, 1996.
- Park, Y.-B., A solution of the bicriteria vehicle scheduling problems with time and area-dependent travel speeds. Computers & Industrial Engineering, 38 (1), 173-187, 2000.
- Jung, S. and A. Haghani, Genetic algorithm for the time-dependent vehicle routing problem. Transportation Network Modeling, 2001 (1771), 164-171, 2001
- Ichoua, S., M. Gendreau, and J.-Y. Potvin, Vehicle dispatching with time-dependent travel times. European Journal of Operational Research, 144 (2), 379-396, 2003.
- Fleischmann, B., M. Gietz, and S. Gnutzmann, Time-varying travel times in vehicle routing. Transportation Science, 38 (2), 160-173, 2004.
- Haghani, A. and S. Jung, A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times. Computers & Operations Research, 32 (11), 2959-2986, 2005.
- Chen, H.K., C.F. Hsueh, and M.S. Chang, The real-time time-dependent vehicle routing problem. Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review, 42(5), 383-408, 2006.
- Woensel, T., et al., A Queueing Framework for Routing Problems with Time-dependent Travel Times. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, 6 (1), 151-173, 2007.
- Van Woensel, T., et al., Vehicle routing with dynamic travel times: A queueing approach. European Journal of Operational Research, 186 (3), 990-1007, 2008.
- Xin, Z., G. Goncalves, and R. Dupas. A genetic approach to solving the vehicle routing problem with time-dependent travel times. in 2008 Mediterranean Conference on Control and Automation - Conference Proceedings, MED'08. 2008.
- Hashimoto, H., M. Yagiura, and T. Ibaraki, An iterated local search algorithm for the time-dependent vehicle routing problem with time windows. Discrete Optimization, 5 (2), 434-456, 2008.
- Kuo, Y.Y., C.C. Wang, and P.Y. Chuang, Optimizing goods assignment and the vehicle routing problem with time-dependent travel speeds. Computers & Industrial Engineering, 57 (4), 1385-1392, 2009.
- Soler, D., J. Albiach, and E. Martínez, A way to optimally solve a time-dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows. Operations Research Letters, 37 (1), 37-42 2009.
- Jabali, O., et al., Time-dependent vehicle routing subject to time delay perturbations. Iie Transactions, 41 (12), 1049-1066. 2009.
- Kuo, Y., Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem. Computers and Industrial Engineering, 59 (1), 157-165. 2010.
- Figliozzi, M.A., The impacts of congestion on time-definitive urban freight distribution networks CO2

- emission levels: Results from a case study in Portland, Oregon. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19 (5), 766-778, 2011.
21. Figliozzi, M.A., The time dependent vehicle routing problem with time windows: Benchmark problems, an efficient solution algorithm, and solution characteristics. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 48 (3), 616-636, 2012.
 22. Kritzinger, S., et al., Using traffic information for time-dependent vehicle routing. *Seventh International Conference on City Logistics*, 39, 217-229, 2012.
 23. Dabia, S., et al., Branch and Price for the Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Transportation Science*, 47 (3), 380-396, 2013.
 24. Mousavipour, S. and S.M.H. Hojjati, A particle swarm optimisation for time-dependent vehicle routing problem with an efficient travel time function. *International Journal of Operational Research*, 20 (1), 109-120, 2014.
 25. Zhang, T., W.A. Chaovalitwongse, and Y.J. Zhang, Integrated Ant Colony and Tabu Search approach for time dependent vehicle routing problems with simultaneous pickup and delivery. *Journal of Combinatorial Optimization*, 28 (1), 288-309, 2014.
 26. Johar, F., C. Potts, and J. Bennell, Solving the Time Dependent Vehicle Routing Problem by Metaheuristic Algorithms. *2nd Ism International Statistical Conference 2014 (Ism-I): Empowering the Applications of Statistical and Mathematical Sciences*, 1643, 751-757, 2015.
 27. Gendreau, M., G. Ghiani, and E. Guerriero, Time-dependent routing problems: A review. *Computers & Operations Research*, 64 (Supplement C), 189-197, 2015.
 28. Wang, X., *Vehicle routing problems that minimize the completion time: Heuristics, worst-case analyses, and computational results.*, University of Maryland, College Park., 2016.
 29. Huang, Y., et al., Time-dependent vehicle routing problem with path flexibility. *Transportation Research Part B: Methodological*, 95, 169-195, 2017.
 30. Rincon Garcia, N., B. Waterson, and T. Cherrett, A hybrid metaheuristic for the time-dependent vehicle routing problem with hard time windows. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8 (1), 141-160. 2017.
 31. Spliet, R., S. Dabia, and T. van Woensel, The Time Window Assignment Vehicle Routing Problem with Time-Dependent Travel Times. *Transportation Science*, 2017.
 32. Parragh, S., K. Doerner, and R. Hartl, A survey on pickup and delivery problems. *Journal für Betriebswirtschaft*, 58 (1), 21-51, 2008.
 33. Ropke, S. and D. Pisinger, A unified heuristic for a large class of Vehicle Routing Problems with Backhauls. *European Journal of Operational Research*, 171 (3), 750-775, 2006.
 34. Karaoglan, I., Dağıtım Ağları Tasarımında Yer Seçimi ve Eğzamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemleri, in *Endüstri Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Doktora Tezi*, 2009
 35. Min, H.K., The Multiple Vehicle-Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up Points. *Transportation Research Part a-Policy and Practice*, 23 (5), 377-386, 1989.
 36. Halse, K., Modeling and solving complex vehicle routing problems, *Institute of Mathematical Statistics and Operations Research (IMSOR), Technical University of Denmark, Ph.D. thesis*, 1992.
 37. Dethloff, J., Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up. *Or Spektrum*, 23 (1), 79-96, 2001.
 38. Nagy, G. and S.d. Salhi, Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 162 (1), 126-141, 2005.
 39. Crispim, J. and B. J., Reactive tabu search and variable neighbourhood descent applied to the vehicle routing problem with backhauls, in *MIC, 4th Metaheuristic International Conference*. Porto, Portugal. 2001.
 40. Chen, J.F. and T.H. Wu, Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups. *The Journal of the Operational Research Society*, 57 (5), 579-587, 2006.
 41. Montane, F.A.T. and R.D. Galvao, A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service. *Computers & Operations Research*, 33 (3), 595-619, 2006.
 42. Bianchessi, N. and G. Righini, Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery. *Computers & Operations Research*, 34 (2), 578-594, 2007.
 43. Ai, T.J. and V. Kachitvichyanukul, A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Operations Research*, 36 (5), 1693-1702, 2009.
 44. Zachariadis, E.E., C.D. Tarantilis, and C.T. Kiranoudis, A hybrid metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up service. *Expert Systems with Applications*, 36 (2), 1070-1081, 2009.
 45. Gajpal, Y. and P. Abad, An ant colony system (ACS) for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup. *Computers & Operations Research*, 36 (12), 3215-3223, 2009.
 46. Zachariadis, E.E., C.D. Tarantilis, and C.T. Kiranoudis, An adaptive memory methodology for the vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 202 (2), 401-411, 2010.
 47. Subramanian, A., et al., Branch-and-cut with lazy separation for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Operations Research Letters*, 39 (5), 338-341, 2011.
 48. Zachariadis, E.E. and C.T. Kiranoudis, A local search metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. *Expert Systems with Applications*, 38 (3), 2717-2726, 2011.
 49. Fan, J., The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery Based on Customer

- Satisfaction. *Procedia Engineering*, 15, 5284-5289. 2011.
50. Wang, H.-F. and Y.-Y. Chen, A genetic algorithm for the simultaneous delivery and pickup problems with time window. *Computers & Industrial Engineering*, 62 (1), 84-95, 2012.
 51. Tasan, A.S. and M. Gen, A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries. *Computers and Industrial Engineering*, 62 (3), 755-761, 2012.
 52. Zachariadis, E.E. and C.T. Kiranoudis, An effective local search approach for the Vehicle Routing Problem with Backhauls. *Expert Systems with Applications*, 39 (3), 3174-3184, 2012.
 53. Goksal, F.P., I. Karaoglan, and F. Altiparmak, A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Industrial Engineering*, 65 (1), 39-53. 2013.
 54. Liu, R., et al., 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 (3), 475-486, 2013.
 55. Reil, S., A. Bortfeldt, and L. Mönch, Heuristics for vehicle routing problems with backhauls, time windows, and 3D loading constraints. *European Journal of Operational Research*, 266 (3), 877-894, 2018.
 56. Koç, Ç. and G. Laporte, Vehicle routing with backhauls: Review and research perspectives. *Computers & Operations Research*, 91 (Supplement C), 79-91. 2018.
 57. Miller, C.E., A.W. Tucker, and R.A. Zemlin, Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM (JACM)*, 7 (4), 326-329, 1960.
 58. Kulkarni, R. and P.R. Bhave, Integer programming formulations of vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 20 (1), 58-67, 1985.
 59. Solomon, M.M., Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 35 (2), 254-265, 1987.
 60. 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.

