



A mixed integer mathematical model and a heuristic approach for two echelon location routing problem with simultaneous pickup and delivery

Ece Arzu Yıldız^{1*}, İsmail Karaoğlan², Fulya Altıparmak¹

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 06570, Türkiye

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, 42050, Türkiye

Highlights:

- Two Echelon Location Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery is considered
- A mixed integer node based mathematical model is presented and a heuristic algorithm is developed for the problem
- Performances of the mathematical model and heuristic algorithm are evaluated on test instances

Graphical/Tabular Abstract

This study considers Two Echelon Location Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery (2E/LRPSPD) which has been recently introduced to literature by the researchers. This study presents a mathematical model to find solution to the problem. Besides mathematical model a heuristic algorithm, CW/2A, based on Clarke-Wright Savings Algorithm is developed. The performances of the mathematical model and CW/2A algorithm are investigated on 128 instances (64 small, 32 medium, 32 large sized) derived from literature. Results indicate that with mathematical model good quality solutions for small-size problems can be reached in reasonable time. Table A depicts the performance evaluation of CW/2A for medium- and large- size problems. Performance criteria are average solution time (second), average percentage deviation from upper bound found by mathematical model in 2-hour computation time limit (APDUB), minimum APDUB, maximum APDUB, number of problems with upper bound found with mathematical model (NPUB). The results show that CW/2A reaches good quality solutions for medium- and large- size problems in a short computation time.

Table A. Computational results of CW/2A for medium- and large- size problems

Number of Customers	Number of Secondary Facilities	Average Solution Time (Sec)	APDUB	Minimum APDUB	Maximum APDUB	NPUB
50	5	0,03	-15,63	-21,68	-7,92	(16/16)
50	10	0,06	-5,95	-16,32	3,11	(16/16)
100	5	0,15	-38,11	-42,18	-33,48	(16/16)
100	10	0,40	-58,19	-70,69	-43,51	(11/16)
Average		0,16	-29,47	-37,72	-20,45	(59/64)

Keywords:

- Two echelon location routing problem
- Simultaneous pickup and delivery
- Integer programming
- Heuristic approach

Article Info:

Research Article
Received: 12.07.2019
Accepted: 20.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.591293

Correspondence:

Author: Ece Arzu Yıldız
e-mail:
arzudemircan@gazi.edu.tr
phone: +90 312 582 3815

Purpose: The aim of the study is to introduce the 2E/LRPSPD which is rarely studied in literature and propose a mathematical model and a heuristic algorithm.

Theory and Methods:

A polynomial size mixed integer mathematical model is presented for the problem. Besides mathematical model a two phase heuristic algorithm (CW/2A) based on the well-known Clarke-Wright Savings algorithm is developed.

Results:

Experimental studies of mathematical model and CW/2A algorithm are performed on test instances derived from literature. Results show that CW/2A algorithm give good quality solutions in considerable short time.

Conclusion:

A node based polynomial sized mathematical model is developed for problem. However, it is hard to find good solutions by using the proposed model for medium and large sized problems in reasonable time. In order to find good quality solutions for these problems, CW/2A algorithm is developed. In future, new algorithms based on metaheuristics can be proposed. In addition, a matheuristic can also be developed using CW/2A.



İki aşamalı yer seçimi ve eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi: Karışık tam sayılı matematiksel model ve sezgisel yaklaşım

Ece Arzu Yıldız^{1*}, İsmail Karaoğlan², Fulya Altıparmak¹

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 06570, Türkiye

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, 42050, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- İki aşamalı yer seçimi ve eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi ele alınmıştır
- Karma tamsayılı bir matematiksel model sunulmuş ve bir sezgisel algoritma önerilmiştir
- Matematiksel model ve sezgisel algoritmanın performansı test problemleri üzerinde analiz edilmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 12.07.2019
Kabul: 20.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.591293

Anahtar Kelimeler:

İki aşamalı yer seçimi ve araç rotalama problemi, eş zamanlı topla dağıt, tam sayılı programlama, sezgisel yaklaşım

ÖZET

Bu çalışmada İki Aşamalı Yer Seçimi ve Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (2A/YS-ETDARP) ele alınmıştır. Bu problemde amaç, fabrika, depo ve müşterilerden oluşan iki aşamalı bir dağıtım ağında en düşük maliyet ile hangi tesislerin hangi aday bölgelere kurulacağı ve her aşamada rotalama faaliyetlerinin nasıl gerçekleşeceğini belirlemektir. Rotalama faaliyetleri iki yönlü olup birincil tesislerden (fabrika) ikincil tesislere (depo) ve ikincil tesislerden müşterilere yapılacak olan dağıtım, müşterilerden ikincil tesislere ve ikincil tesislerden birincil tesislere gönderilmek üzere toplama faaliyetlerini kapsamaktadır. 2A/YS-ETDARP'nin çözümü için iki indisli düğüm tabanlı karışık tamsayılı bir matematiksel model önerilmiştir. Problem NP-Zor problemler sınıfında yer aldığından dolayı büyük boyutlu problemlerin çözümü için Clarke-Wright algoritmasına dayalı bir çözüm kurucu sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Sezgisel algoritmanın performansını değerlendirmek için literatürden elde edilmiş değişik veri setleri üzerinde deneysel bir çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda sezgisel algoritmanın orta ve büyük boyutlu problemlere çok kısa sürelerde iyi çözümler ürettiği görülmüştür. Dolayısıyla bu çalışmanın literatüre katkısı küçük boyutlu problemlerin çözümü için etkin bir matematiksel modelin sunulması, orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için çok hızlı ve kaliteli çözüm üreten bir çözüm kurucu algoritmanın geliştirilmesidir.

A mixed integer mathematical model and a heuristic approach for two echelon location routing problem with simultaneous pickup and delivery

H I G H L I G H T S

- Two echelon location routing problem with simultaneous pickup and delivery is considered
- A mixed integer node based mathematical model is presented and a heuristic algorithm is developed for the problem
- Performances of the mathematical model and heuristic algorithm are evaluated on test instances

Article Info

Research Article
Received: 12.07.2019
Accepted: 20.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.591293

Keywords:

two echelon location routing problem, simultaneous pickup and delivery, integer programming, heuristic approach

ABSTRACT

This study considers Two Echelon Location Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery (2E/LRP-SPD). In a two-echelon distribution network consisting of factories, warehouses and customers, the aim is to determine which facilities will be opened in which candidate regions and routing activities to be carried out among them. Routing activities include distributing and collecting activities. While distributing activities are performed from primary facilities (factory) to secondary facilities (depots) and secondary facilities to customers, collecting activities are done from customers to the secondary facilities and from secondary facilities to primary facilities. We propose a two-index node based mixed integer programming formulation for the 2E-LRPSPD. As the problem is in NP-Hard problem class, a constructive heuristic algorithm based on Clarke-Wright algorithm is developed to solve medium- and large- size problems. The performance of the heuristic approach is investigated on test instances derived from literature. Computational results show that heuristic algorithm gives good quality solutions for medium- and large-size instances in a very short computation time. Thus, the contribution of this study to the literature is to present an efficient mathematical model for solving small-size problems and to develop a constructive heuristic algorithm that produces very fast and high-quality solutions for medium and large-size problems.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / *Corresponding Author/Authors: *arzuDEMIRCAN@gazi.edu.tr, ikaraoglan@ktun.edu.tr, fulyaal@gazi.edu.tr /

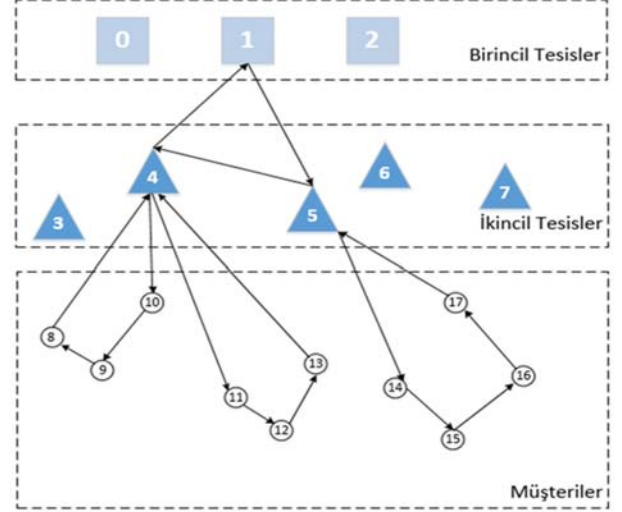
Tel: +90 312 582 3815

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küreselleşmeyle birlikte rekabet koşullarının zorlaşması, firmaların bütçelerinin önemli bir kısmını oluşturan lojistik maliyetleri düşürmek için dağıtım ağlarını iyileştirmeye odaklanmalarını sağlamıştır. Depoların yerleri ve depolardan müşterilere ürün dağıtımları dağıtım sistemi tasarımındaki ana bileşenlerdir. Literatürdeki pek çok çalışmada müşterilerin doğrudan depolardan hizmet aldığı varsayılmıştır [1, 2]. Ancak, gerçek hayat uygulamalarında müşteri taleplerinin araç kapasitesinden az olduğu durumlarla sıklıkla karşılaşmaktadır ve müşterilere dağıtım rotaları üzerinden gerçekleştirilmektedir [3]. Depoların yerlerinin belirlenmesi ve depolardan müşterilere araç rotalarının oluşturulması problemleri uzun yıllar boyunca literatürde ayrı ayrı ele alınmıştır [4]. Bununla ilgili olarak Salhi ve Rand [5] depo yerleri belirlenirken rotaların dikkate alınmamasının eniyi çözüme ulaşılabilmesi ile sonuçlanabileceği vurgulamıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar ise dağıtım sistemlerindeki en uygun maliyetli çözümlere depo yer seçimi ve araç rotalama problemlerinin birlikte ele alındığında ulaşıldığını göstermektedir [4, 6]. Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi (YS-ARP) olarak adlandırılan bu problemde, depo yer seçimi kararları ve bu depolardan müşterilere hizmet veren araçların rota kararları birlikte verilmektedir [4]. Bu problem, tüm müşterilerin taleplerini araç kapasitesi, rota uzunluğu vb. kısıtlar altında araç sabit maliyeti, depo sabit maliyeti ve depo işletme giderleri gibi maliyetleri en küçükleyerek karşılamayı amaçlar. Birden fazla kararı bünyesinde barındıran YS-ARP gerçek hayatta yiyecek içecek dağıtım, askeri ekipman yerleşimi, telekomünikasyon ağı tasarımı gibi birçok sektörde karşımıza çıkmaktadır [7]. Lojistik ağlarda karşılaşılan bu problem ile ilgili kapsamlı literatür taramaları Min vd.[8], Nagy vd.[9], Drexler vd. [10] ve Prodhon vd.[4] tarafından sunulmuştur.

Son yıllarda araştırmacılar lojistik, şehir içi dağıtım ve trafik yönetimini bir araya getirerek şehir lojistiği kavramını ortaya koymuşlardır [11]. Bu kavram şehir içindeki dağıtım akışlarının stratejik, taktik ve operasyonel seviyedeki planlaması olarak tanımlanabilir. Şehir içinde ana depolardan son müşteriye doğrudan dağıtım pratikte uygulanabilir olmadığı için ara seviye tesislere ihtiyaç duyulmuştur. Bu tipte bir dağıtım ağında ana depolar ara depolara, ara depolar da son müşteriye hizmet vermektedir. Bu dağıtım sisteminde ortaya çıkan bir problem literatürde İki Aşamalı Yer Seçimi ve Araç Rotalama Problemi (2A/YS-ARP) olarak adlandırılır. 2A/YS-ARP için örnek bir dağıtım ağı Şekil 1'de verilmektedir. Bu dağıtım ağının bileşenleri birincil tesisler, birincil araçlar, ikincil tesisler, ikincil araçlar ve müşterilerdir. Genellikle şehir sınırlarına yakın yerlerde kurulan birincil tesisler yüksek kapasiteli depolardır. Bu tesislerde müşteri talepleri birincil araçlara yüklenir. Her bir birincil araç bir veya daha fazla ikincil tesisi ziyaret eder. İkincil tesisler düşük kapasiteli depolardır ve yük transferi için kullanılırlar. Bu tesislerde birincil tesislerden birincil araçlar ile gelen yükler düşük kapasiteli ikincil araçlara

yüklenir. İkincil araçlar şehir içi yük transfer operasyonları için uygundur. Her bir ikincil araç bir veya daha fazla müşteriyi ziyaret eder ve her müşteriye bir ikincil araç tarafından hizmet verilir. Her iki aşamada da bir rota başladığı tesiste sonlanır [12].



Şekil 1. 2A/YS-ARP için Örnek Dağıtım Ağı
(An Example for 2E-LRP Distribution Network)[12]

2A/YS-ARP'de müşterilerin sadece dağıtım talepleri olduğu kabul edilir ve bu taleplerin dağıtımını depolardan müşterilere doğru tek yönlü olarak gerçekleştirilir. Ancak, pratik hayatta müşterilerin hem dağıtım hem de toplama talepleri olabilmektedir. Depolardan müşterilere gönderilecek dağıtım taleplerinin aksine müşterilerden depolara gönderilecek ürün olarak tanımlanan toplama talepleri, genellikle müşterilere dağıtım talepleri teslim edildikten sonra aynı araçlar ile depolara taşınır. Daha düşük maliyetli olan bu taşımacılık sistemi literatürde Eş-Zamanlı Topla Dağıtım Araç Rotalama Problemi (ETDARP) olarak adlandırılmış olup uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir problem tipidir [13]. Bu problemin heterojen araç filosunu dikkate alan versiyonu Keçeci vd. [14], dolaşımda olan araçlara gelen taleplerin dikkate alındığı dinamik versiyonu Aydoğdu ve Özyörük [15], bölünmüş dağıtımlı versiyonu Bayrak ve Özyörük [16], malzeme taşıma maliyetlerini de dikkate alan versiyonu Hornstra vd. [17], zaman bağımlı versiyonu ise Can Atasagun ve Karaoğlan [18] tarafından bu problemin farklı versiyonları ile ilgili yapılan çalışmalardandır. Probleme ilgili kapsamlı literatür taramaları Parragh vd. [19], Berbeglia vd. [20] ve Koç vd. [21] tarafından yapılmıştır. Problem şehir lojistiği kavramıyla birlikte son yıllarda iki aşamalı olarak incelenmeye başlanmış ve literatürde İki Aşamalı Eş-Zamanlı Topla Dağıtım Araç Rotalama Problemi (2A/ETDARP) olarak isimlendirilmiştir [22].

Bu çalışmada, dağıtımda eş zamanlı topla dağıtım faaliyetlerinin söz konusu olduğu 2A/YS-ARP ele alınmış ve problem İki Aşamalı Yer Seçimi ve Eş Zamanlı Topla Dağıtım

Araç Rotalama Problemi (2A/YS-ETDARP) olarak adlandırılmıştır [23]. Pratikte bu problem ile tersine lojistik faaliyetlerinin gerçekleştirildiği durumlarda karşılaşılmaktadır. İçecek endüstrisi problemin uygulama alanlarından birisidir. Firmalar hem içecekleri dağıtmakta hem de tekrar kullanmak için boş şişeleri toplamaktadır. Dolu şişeler birincil tesislerden ikincil tesislere ve buralardan mağazalara gönderilirken boş şişeler dağıtım sırasında toplanmaktadır. Bir diğer uygulama alanı ise süpermarket zincirleridir. Tedarikçiden paletlerle veya kasalarla ikincil tesislere gelen malzemeler ikincil tesislerden süpermarketlere gönderilir. Süpermarketlerde boşalan kasa veya paletler ise ara depoya gönderilir. 2A/YS-ETDARP’de amaç, tesis ve araç kapasitesi, rota uzunluğu gibi kısıtlar altında ikincil tesislerin açılacağı yerler ile birinci ve ikinci aşamadaki araç rotalarını, toplam maliyeti (araç/tesis sabit maliyetleri, tesis işletme maliyetleri ve rota maliyetleri) en küçükleyecek şekilde belirlemektir. Bu makalede, problemin çözümü için bir matematiksel model sunulmuştur. Problem NP-Zor problemler sınıfında yer aldığı için makul süreler içerisinde orta ve büyük boyutlu problemler için eniyi çözümü matematiksel modelin çözümü ile bulmak mümkün olmamaktadır. Probleme kısa sürelerde çözüm elde edebilmek amacıyla Clarke-Wright Tasarruf (CW) algoritmasına [24] dayalı bir kurucu sezgisel algoritma önerilmiştir. Matematiksel model ve sezgisel algoritmanın performansı farklı boyutlardaki 128 test problemi üzerinde incelenmiştir.

Makalenin ikinci bölümünde problem ile ilgili literatür araştırmasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde problem tanımı ve önerilen matematiksel model, dördüncü bölümde ise orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için geliştirilen sezgisel algoritma sunulmuştur. Beşinci bölümde, matematiksel model ve sezgisel algoritmanın performansı test problemleri üzerinde incelenmiştir. Son olarak altıncı bölümde sonuç ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE SURVEY)

2A/YS-ETDARP ile ilgili çok kısıtlı sayıda çalışma olduğundan dolayı bu problemin alt problemleri olan 2A/YS-ARP, YS-ETDARP ve 2A/ETDARP üzerinde literatür araştırması yapılmıştır.

2A/YS-ETDARP’de müşterilerin dağıtım ya da toplama taleplerinin tamamının “0” olduğu veya her müşterinin dağıtım talebinin toplama talebinden küçük olduğu ya da tam tersi durumda 2A/YS-ARP elde edilir. 2A/YS-ARP problemi ile ilgili ilk çalışmalar, Boccia vd. [12] ve Boccia vd. [25], Nguyen vd. [26], Nguyen vd. [27], Nguyen vd. [28] ve Nikbakhsh ve Zegordi [29] tarafından yapılmıştır. Boccia vd. [25], 2A/YS-ARP’yi çözmek için karışık tam sayılı matematiksel modeller ve Tabu aramaya dayalı bir sezgisel algoritma geliştirmiştir. Nguyen vd. [26] problem için GRASP ve evrimsel yerel arama/iteratif yerel arama sezgisellerini melezleyerek yeni bir metasezgisel önermiştir. Araştırmacılar aynı problem için dört kurucu sezgisel ve iki

GRASP tabanlı karma metasezgisel geliştirmiştir [27]. Bu metasezgisellerde GRASP ile öğrenme süreci ve yol bağlama sezgisellerini birleştirmiştir. Nguyen vd. [28], problem için çok başlangıçlı iteratif yerel arama sezgiseli geliştirmiştir. Üç açgözlü rassal arama sezgiselini döngüsel olarak kullanarak bir başlangıç çözümü oluşturmuştur. Nikbakhsh ve Zegordi [29], 2A/YS-ARP’nin gevşek zaman pencereli versiyonu için dört indisli yeni bir matematiksel model önermiştir. Ayrıca problem için etkin bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Contardo vd. [30], 2A/YS-ARP için iki indisli bir matematiksel model geliştirmiş ve bir dal kesme metodu önermiştir. Govindan vd. [31], iki aşamalı zaman pencereli yerleşim rotalama problemi için çok amaçlı bir model geliştirmiştir. Çevreyi korumak için karbon ayak izinden kaynaklanan maliyetleri azaltmak da amaçlar arasındadır. Araştırmacılar çok amaçlı parçacık sürüştü optimizasyonu algoritması ve adaptif çok amaçlı değişken komşu arama algoritmalarını melezleyerek yeni bir algoritma ortaya koymuşlardır. Bala vd. [32], belirli bir zaman penceresi içinde müşterilere teslim edilmesi gereken çabuk bozulabilir ürünler için üretim çizelgesini de dikkate alarak iki aşamalı yerleşim rotalama problemi için tavlama benzetimine dayalı bir algoritma geliştirmiştir. Pichka vd. [33], üçüncü parti lojistik firmalarını 2A/YS-ARP problem kapsamına dâhil etmiştir. Bu problem tipinde her iki aşamada da araçlar rotaya depodan başlamakta ancak dağıtım bitiminde başladıkları depoya dönmemektedir. Problem için üç adet akış tabanlı matematiksel model önermiş bir de karma sezgisel geliştirmişlerdir. Veenstra vd. [34], Hollanda sağlık sisteminde karşılaşılan farklı bir 2A/YS-ARP gerçek hayat problemini ele almıştır. Klasik problemden farklı olarak ikinci aşamada ilaç dağıtımını ara depolara veya ara depolara uzakta kalan müşteri varsa doğrudan müşterilere yapılabilmektedir. Problemin çözümü için bir matematiksel model bir de karma sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Wang vd. [35], zaman pencereli değişken müşteri talepli 2A/YS-ARP için maliyet enküçüklenirken müşteri memnuniyetini enbüyüklemeyi amaçlayan iki amaçlı problem üzerinde çalışmışlardır ve problem için genetik algoritma tabanlı bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Grüler vd. [36], müşteri taleplerini stokastik olarak ele alarak Monte-Carlo simülasyon tekniği ve Clarke-Wright Tasarruf algoritmasını temel alan bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Yu vd. [38] problemin çok amaçlı versiyonunu çöp toplama hizmeti için ele almış ve Clarke-Wright Tasarruf algoritmasından da faydalanan genetik algoritmaya dayalı bir metasezgisel yöntem önermişlerdir. Darvish vd. [37] problemin esnek versiyonu üzerinde çalışmışlardır. Dağıtım ağı tasarımı ve teslim zamanları tasarımı esneklik olmak üzere temel olarak iki esneklik kaynağını dikkate alan çalışmada matematiksel modelin yanı sıra dal-sınır algoritmasına dayalı bir de kesin çözüm yöntemi önermişlerdir. Probleme ilgili çalışmaların bir özeti Tablo 1’de verilmiştir.

2A/YS_ETDARP’de sadece ikinci aşamanın dikkate alınması durumunda problem YS-ETDARP’ye dönüşür. YS-ETDARP için literatürde sınırlı sayıda çalışma vardır. Karaoğlan vd. [7], YS-ETDARP için geçerli eşitsizlikleri ve

yerel arama tabanlı tavlama benzetimi algoritmasını kullanarak üst sınırları iyileştirdikleri bir dal-kesme algoritması geliştirmişlerdir. Karaoğlan vd. [39], düğüm tabanlı ve akış tabanlı iki polinom zamanlı karışık tam sayılı model önermiş ve bu modelleri geçerli eşitsizlikler ile güçlendirmişlerdir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için ise iki aşamalı tavlama benzetimine dayalı bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Yu ve Lin [40], problem için çok başlangıçlı tavlama benzetimi algoritması geliştirmişlerdir. Karaoğlan vd. [39] çalışmasındaki algoritma ile geliştirdikleri algoritmanın tek başlangıç çözümü kullanan versiyonu ile karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. Yu ve Lin [41] çalışmasında özel bir kod çözme mekanizması kullanan Tavlama Benzetimi algoritmasına dayalı bir

sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarında, Karaoğlan vd. [7] ile karşılaştırmalı analizler yapmışlardır. Abedinzadeh vd. [42] çalışmalarında Karaoğlan vd. [7] çalışmasını temel almış ve problemin heterojen filolu versiyonu için ekolojik boyutu da problem kapsamına dahil etmiştir. Problem için matematiksel model tanımlamış rasgele üretilmiş test problemleri üzerinde matematiksel modelin etkinliğini analiz etmişlerdir. Makale başlığında her ne kadar iki aşamanın bulunduğu yazılmış olsa da makale içeriğinde bahsedilen aşamaların müşteriler ve depolar olduğu, çalışılan problemde tek aşamanın değerlendirildiği görülmüştür. Bu problemle ilgili olarak literatürde bulunan sınırlı sayıdaki çalışmalar için özet tablo Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 1. 2A/YS-ARP üzerine yapılmış ilgili çalışmalar (Related Research Papers on 2E-LRP)

Çalışma	Matematiksel Model	Çözüm Yöntemi
Boccia vd. (2011)	✓	Tabu Arama
Nikbakhsh ve Zegordi (2010)	✓	Or-Opt sezgiseli ile iyileştirme yapan iki aşamalı sezgisel algoritma
Contardo vd. (2012)	✓	Adaptif Geniş Komşu Arama sezgiseli, Dal-Kesme algoritmasına dayalı kesin çözüm yöntemi
Nguyen vd. (2012a)	✓	GRASP, Öğrenme Süreci, Yol Bağlama sezgisellerinden oluşan karma sezgisel algoritma
Nguyen vd. (2012b)	✓	Çok Başlangıçlı İteratif Yerel arama ve Açgözlü Arama, Tabu Arama içeren karma sezgisel
Govindan vd. (2014)	✓	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
Rahmani vd. (2016)	✓	Yerel Arama, En Yakın Komşu temelli sezgisel algoritma
Bala vd. (2017)	-	Tavlama Benzetimi
Grüler vd. (2017)	-	Clarke-Wright Tasarruf Algoritması, Monte-Carlo Simülasyonu
Pichka vd. (2018)	✓	Clarke-Wright Tasarruf Algoritması, Matematiksel model tabanlı sezgisel algoritma
Veenstra vd. (2018)	✓	Değişken Komşu Arama Algoritmasına dayalı sezgisel algoritma
Wang vd. (2018)	✓	Genetik Algoritma
Darvish vd. (2019)	✓	Dal-Sınır Algoritmasına dayalı kesin çözüm yöntemi
Yu vd. (2020)	-	Clarke-Wright Tasarruf Algoritması, Genetik Algoritmaya dayalı sezgisel algoritma

Tablo 2. YS-ETDARP üzerine yapılmış çalışmalar (Research Papers on LRPSPD)

Çalışma	Matematiksel Model	Çözüm Yöntemi
Karaoğlan vd. (2011)	✓	Tavlama Benzetimi Metasezgiseli, Dal-Kesmeye dayalı kesin çözüm yöntemi
Karaoğlan vd. (2012)	✓	İki aşamalı tavlama benzetimine dayalı sezgisel
Yu ve Lin (2014)	-	Çok Başlangıçlı Tavlama Benzetimi
Yu ve Lin (2016)	-	Tavlama Benzetimi Temelli Algoritma
Abedinzadeh vd. (2017)	✓	-

2A/YS-ETDARP'de tesis yerlerinin önceden bilinmesi durumunda problem 2A/ETDARP'ye dönüşmektedir. Literatürde bu problem ile ilgili sadece bir çalışma bulunmaktadır. Belgin vd. [22] tarafından yapılan çalışmada problem için düğüm tabanlı bir matematiksel model geliştirilmesinin yanı sıra problem için Değişken Komşu Arama ve Yerel Arama sezgisellerinden faydalanarak bir karma sezgisel algoritma önerilmiştir.

2A/YS-ETDARP ile ilgili literatürde az sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan ilki 2A/YS-ETDARP'nin farklı bir türü olan iki aşamalı çok ürünlü yer seçimi ve eş zamanlı topla dağıtım araç rotalama problemi (2A-ÇÜ/YS-ETDARP) ile ilgilidir. Rahmani vd. [43]'te çalışılan problem çok ürün, aynı rotada bir veya daha fazla ikincil tesisi dikkate alınmasının yanı sıra müşterilerin dağıtım veya toplama taleplerini dikkate almaktadır. Bu yönleriyle 2A/YS-ETDARP'den ayrılmaktadır. İkinci çalışma ise tarafımızca [23] 2A/YS-ETDARP için yapılmıştır. Biri düğüm birisi akış tabanlı iki matematiksel model geliştirilmiş ve literatürde bulunan geçerli eşitsizliklerle güçlendirilmiştir. Bu matematiksel modellerin performansları test problemleri üzerinde analiz edilmiştir. Bir diğer çalışma ise Fan vd. [44] tarafından yapılmış, problem için üç indisli matematiksel model önerilmiştir. Geliştirdikleri matematiksel model tarafımızdan geliştirilmiş olan ve bu makalede sunulan matematiksel modele göre oldukça fazla karar değişkeni ve kısıt içermektedir. Bu durum model boyutunu artırmanın yanı sıra modelin çözümü için gereken süreyi de uzatmaktadır. Fan vd. [44] büyük boyutlu problemlere makul süreler içerisinde çözüm bulmak için değişken komşu iniş algoritmasına ve yerel arama algoritmalarına dayalı çok başlangıçlı yol bağlama sezgiseli önermişlerdir. Geliştirdikleri sezgisel algoritmayı literatürde bulunan test problemleri üzerinde test etmişlerdir.

2A/YS-ETDARP, NP-Zor problemler sınıfında yer almaktadır. 2A/YS-ETDARP'nin alt problemleri de NP-Zor problemler sınıfındadır. Yapılan literatür araştırmasında 2A/YS-ETDARP'm alt problemleri olan 2A/YS-ARP ve YS-ETDARP'ye kısa sürelerde iyi çözümler bulmak için tabu arama [25], adaptif geniş komşu arama [30], çok başlangıçlı iteratif yerel arama [27], parçacık sürüsü optimizasyonu [31], tavlama benzetimi [32, 39-41], genetik algoritma [35] gibi sezgisel algoritmaların geliştirildiği görülmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada da orta ve büyük boyutlu 2A/YS-ETDARP'a kısa süre içerisinde iyi kalitede çözümler üretebilmek için klasik çözüm kurucu algoritmalarından biri olan Clarke-Wright Tasarruf Algoritmasına dayalı bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Literatürde pek çok çalışmada klasik algoritmalarından faydalandığı görülmektedir [39, 4]. Klasik çözüm kurucu algoritmalar büyük boyutlu, karmaşık problemlerde kısa sürede uygun çözüm üretebilmektedir. Bunun yanı sıra bulunan çözüm metasezgisel algoritmalara başlangıç çözümü olarak verildiğinde iyi çözümlere ulaşma süresini de kısaltabilmektedir. Ayrıca dinamik problemlerde çözümün kısa sürede üretebilmesi için yine klasik sezgisellerden faydalanılabilmektedir.

3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYON (PROBLEM DESCRIPTION AND MATHEMATICAL FORMULATION)

Bu bölümde, 2A/YS-ETDARP için bir karışık tamsayılı matematiksel model sunulmuştur. Model, YS-ETDARP için Karaoğlan'ın çalışmasında [39] önerilen matematiksel modele dayalıdır. Temel alınan model tek aşamalı bir lojistik sistemi dikkate almaktadır. 2A/YS-ETDARP'de ise lojistik sistemin kapsamına bir seviye daha eklenmiştir. Gerekli yeni karar değişkenleri ve kısıtlar tanımlanarak her iki aşamasında toplama ve dağıtım faaliyetlerinin gerçekleştirildiği yeni sistemin matematiksel modeli tanımlanmıştır[23]. Bu şekilde daha kapsamlı bir sistem ele alınmış ve daha kapsamlı bir matematiksel model oluşturulmuştur.

2A/YS-ETDARP şu şekilde tanımlanır: $G = (N, A)$ tam bağlı bir serim olsun. $N = N_c \cup N_D \cup \{0\}$ düğüm kümesi ve A ise bu düğümler arasında tanımlanan ayrıt kümesidir ($A = \{(i, j) : i, j \in N\}$). Düğüm kümesinde, potansiyel ikincil tesis (ara depo) kurulum noktalarını N_D , müşterileri N_c ve birincil tesisi (ana depo) ise "0" temsil etmektedir. Birinci aşamadaki düğüm kümesini N_1 ($N_1 = \{0\} \cup N_D$), ikinci aşamadaki düğüm kümesini de N_2 ($N_2 = N_c \cup N_D$) göstermektedir. Her ayrıt (i, j) için negatif olmayan bir maliyet (uzaklık) c_{ij} tanımlanmıştır ve ayrıtlar üçgen eşitsizliğine ($c_{ij} + c_{jk} \geq c_{ik}$) uymaktadır. Her potansiyel ikincil tesis düğümü $t \in N_D$ için bir kapasite CD_t ve bir sabit maliyet FD_t söz konusudur. Her aşamada kapasiteleri (CV_1, CV_2) ve sabit işletim maliyetleri (FV_1, FV_2) bilinen sınırsız sayıda homojen araç bulunmaktadır. 2A/YS-ETDARP'de her müşterinin $l \in N_c$ dağıtım talebi (d_l) ve toplama talebi (p_l) vardır. 2A/YS-ETDARP, toplam ikincil tesis yerleşim maliyetleri, her iki aşamada araç maliyetleri ve rotalama maliyetleri enküçüklenecek şekilde aşağıdaki kısıtları sağlayarak ikincil tesislerin yerini belirlemeyi ve her iki aşamada rotaları oluşturmayı amaçlar.

- Birinci aşamada her rota birincil tesisten başlar ve sonlanır.
- İkinci aşamada her rota başladığı ikincil tesiste sonlanır.
- Her ikincil tesis bir kere tek bir birincil araç tarafından ziyaret edilir.
- Her müşteri bir kere tek bir ikincil araç tarafından ziyaret edilir.
- Her bir ayrıttaki toplam araç yükü o aşamadaki aracın kapasitesini aşamaz.

Problemin matematiksel modelinde kullanılan kümeler, parametreler, karar değişkenleri ve ek değişkenler Tablo 3'te verilmektedir.

2A/YS-ETDARP için önerilen matematiksel model:

Tablo 3. Matematiksel Modelde Kullanılan Kümeler, Parametreler, Karar Değişkenleri ve Ek Değişkenler
(Sets, Parameters, Decision Variables, Additional Decision Variables used in Mathematical Model)

Kümeler	
N	Düğüm kümesi $N = N_c \cup N_D \cup \{0\}$
N_D	İkincil Tesis düğümlerinin kümesi
N_c	Müşteri düğümlerinin kümesi
$\{0\}$	Birincil Tesis düğümü
N_1	Birinci Aşama düğümlerinin kümesi ($N_1 = \{0\} \cup N_D$)
N_2	İkinci Aşama düğümlerinin kümesi ($N_2 = N_c \cup N_D$)
Parametreler	
CD_t	t ikincil tesisinin kapasitesi
FD_t	t ikincil tesisinin sabit maliyeti
CV_1	Birincil araçların kapasitesi
CV_2	İkincil araçların kapasitesi
FV_1	Birincil araçların sabit maliyeti
FV_2	İkincil araçların sabit maliyeti
d_i	1 müşterisinin dağıtım talebi
p_i	1 müşterisinin toplama talebi
Karar Değişkenleri	
x_{ij}	İkili karar değişkeni, Birincil araç birinci aşamada düğüm i'den düğüm j'ye giderse 1 değerini alır ($\forall i, j \in N_1$)
h_{lm}	İkili karar değişkeni, İkincil araç ikinci aşamada düğüm l'den düğüm m'ye giderse 1 değerini alır ($\forall l, m \in N_2$)
a_t	İkili karar değişkeni, İkincil tesis t açılırsa 1 değerini alır ($t \in N_D$)
w_{mt}	İkili karar değişkeni, Müşteri m, t ara deposuna atanırsa 1 değerini alır ($m \in N_c, \forall t \in N_D$)
Ek Karar Değişkenleri	
U_t	İkincil tesis t'ye hizmet vermeden hemen önce birincil araçtaki ikincil tesislere teslim edilecek yük miktarı ($\forall t \in N_D$)
V_t	İkincil tesis t'ye hizmet verdikten hemen sonra birincil araçtaki ikincil tesislerden toplanan yük miktarı ($\forall t \in N_D$)
U_m	Müşteri m'ye hizmet vermeden hemen önce ikincil araçtaki müşterilere teslim edilecek yük miktarı ($\forall m \in N_c$)
V_m	Müşteri m'ye hizmet verdikten hemen sonra ikincil araçtaki müşterilerden toplanan yük miktarı ($\forall m \in N_c$)
P_t	t ikincil tesisinin toplama talebi ($t \in N_D$)
D_t	t ikincil tesisinin dağıtım talebi ($t \in N_D$)

$$\text{Min } \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} c_{ij} x_{ij} + \sum_{t \in N_D} FV_1 x_{0t} + U_j - U_i + CV_1 x_{ij} \leq CV_1 - D_j \quad \forall i, j \in N_D, i \neq j \quad (4)$$

$$\sum_{l \in N_2} \sum_{m \in N_2} c_{lm} h_{lm} + \sum_{t \in N_D} FD_t a_t + \sum_{t \in N_D} \sum_{m \in N_c} FV_2 h_{tm} \quad (1) \quad D_t \leq U_t \quad \forall t \in N_D \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N_1} x_{jt} = a_t \quad \forall t \in N_D \quad (2) \quad U_t \leq CV_1 \quad \forall t \in N_D \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N_1} x_{ji} - \sum_{j \in N_1} x_{ij} = 0 \quad \forall i \in N_1 \quad (3) \quad D_t = \sum_{m \in N_c} w_{mt} d_m \quad \forall t \in N_D \quad (7)$$

$$\sum_{m \in N_c} w_{mt} d_m \leq CD_t a_t \quad \forall t \in N_D \quad (8)$$

$$V_t - V_e + CV_1 x_{te} \leq CV_1 - P_e \quad \forall t, e \in N_D, t \neq e \quad (9)$$

$$P_t \leq V_t \quad \forall t \in N_D \quad (10)$$

$$V_t \leq CV_1 \quad \forall t \in N_D \quad (11)$$

$$U_t + V_t - D_t \leq CV_1 \quad \forall t \in N_D \quad (12)$$

$$P_t = \sum_{m \in N_c} w_{mt} p_m \quad \forall t \in N_D \quad (13)$$

$$\sum_{m \in N_c} w_{mt} p_m \leq CD_t a_t \quad \forall t \in N_D \quad (14)$$

$$\sum_{m \in N_2} h_{lm} = 1 \quad \forall l \in N_C \quad (15)$$

$$\sum_{m \in N_2} h_{lm} - \sum_{m \in N_2} h_{ml} = 0 \quad \forall l \in N_2 \quad (16)$$

$$\sum_{t \in N_D} w_{mt} = 1 \quad \forall m \in N_C \quad (17)$$

$$h_{mt} \leq w_{mt} \quad \forall t \in N_D, \forall m \in N_C \quad (18)$$

$$h_{lm} \leq w_{ml} \quad \forall t \in N_D, \forall m \in N_C \quad (19)$$

$$h_{lm} + w_{lt} + \sum_{e \in N_D, e \neq t} w_{me} \leq 2 \quad \forall l, m \in N_C, l \neq m, \forall t \in N_D \quad (20)$$

$$U_m - U_l + CV_2 h_{lm} + (CV_2 - d_l - d_m) h_{ml} \leq CV_2 - d_l \quad \forall l, m \in N_C, l \neq m \quad (21)$$

$$V_m - V_l + CV_2 h_{lm} + (CV_2 - p_l - p_m) h_{ml} \leq CV_2 - p_m \quad \forall l, m \in N_C, l \neq m \quad (22)$$

$$d_l + \sum_{m \in N_C, l \neq m} h_{lm} d_m \leq U_l \quad \forall l \in N_C \quad (23)$$

$$U_l \leq CV_2 - (CV_2 - d_l) \sum_t h_{lt} \quad \forall t \in N_D, \forall l \in N_C \quad (24)$$

$$p_l + \sum_{m \in N_C, l \neq m} p_m h_{ml} \leq V_l \quad \forall l \in N_C \quad (25)$$

$$V_l \leq CV_2 - (CV_2 - p_l) \sum_{t \in N_D} h_{lt} \quad \forall l \in N_C \quad (26)$$

$$U_l + V_l - d_l \leq CV_2 \quad \forall l \in N_C \quad (27)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N_1 \quad (28)$$

$$w_{mt} \in \{0,1\} \quad \forall m \in N_D, \forall l \in N_C \quad (29)$$

$$a_t \in \{0,1\} \quad \forall t \in N_D \quad (30)$$

$$h_{lm} \in \{0,1\} \quad \forall l, m \in N_2 \quad (31)$$

$$U_m, V_m, U_t, V_t, D_t, P_t \geq 0 \quad \forall t \in N_D, \forall m \in N_C \quad (32)$$

Bu modelde $\max\{(d_l + d_m), (p_l + p_m), (d_m + p_l)\} > CV_2$: $\forall l, m \in N_C, l \neq m$ olduğu durumlar için $h_{lm} = 0$ olarak belirlenir. Bu kısıtlama toplam talebin araç kapasitesinden büyük olduğu uygun olmayan müşteri çiftlerinin oluşmasını engeller. Matematiksel modelin amaç fonksiyonu Eş. 1, ara depo kurma, rotalama ve araç maliyetleri toplamını enküçükleme Eş. 2 – Eş. 14 birinci aşama, Eş. 15 – Eş. 27 ikinci aşama için oluşturulan kısıtlardır. Eş. 2 birinci aşamada açılan ikincil tesislere bir kez uğranmasını sağlar. Eş. 3 birinci aşamada bütün düğümlere giren ve çıkan hat sayısını birbirine eşitler. Eş. 4, birinci aşamada ikincil tesislerin dağıtım taleplerini karşılamayı garantilerken dağıtım turları için alt tur oluşumlarını engellemektedir. Eş. 5 ve Eş. 6, U_t için alt ve üst sınırları belirler. Eş. 7, birinci aşamada yer alan ikincil tesislerin dağıtım taleplerinin ikinci aşamada bu ikincil tesislere atanan müşterilerin toplam dağıtım talebine eşit olmasını sağlamaktadır. Eş. 8, açılmış olan bir ikincil tesisten karşılanan müşterilerin dağıtım talepleri toplamının ikincil tesisin kapasitesini aşamayacağını ifade eder. Eş. 9, birinci aşamada ikincil tesislerin toplama taleplerini karşılamayı garantilerken toplama turları için alt tur oluşumlarını engellemektedir. Eş. 10 ve Eş. 11, V_t için alt ve üst sınırları belirler. Eş. 12, birinci aşamada rota üzerinde taşınan yük miktarının birincil araç kapasitesinden küçük olmasını sağlamaktadır. Eş. 13, birinci aşamada yer alan ikincil tesislerin toplama taleplerinin ikinci aşamada bu tesislere atanan müşterilerin toplam toplama talebine eşit olmasını sağlamaktadır. Eş. 14, ise açılmış olan bir ikincil tesisten karşılanan müşterilerin toplama talepleri toplamının ikincil tesisin kapasitesini aşamayacağını ifade eder. Eş. 15, ikinci aşamada her müşterinin mutlaka bir kere ziyaret edilmesini sağlamaktadır. Eş. 16, ikinci aşama için her düğüme giren ve çıkan ayrıtların sayısının eşit olmasını sağlamaktadır. Eş. 17, her müşterinin bir ikincil tesise atanmasını sağlamaktadır. Eş. 18, Eş. 19 ve Eş. 20 ise ikinci aşamada geçersiz rotaların oluşmasını engellemektedir (aynı ikincil tesiste başlayıp sonlanmamak gibi). Eş. 21, ikinci aşamadaki dağıtım talepleri için akış eşitsizlikleridir ve alt turların oluşmasını engelleyerek her müşterinin dağıtım taleplerinin karşılanmasını sağlamaktadır. Eş. 22, ikinci aşamadaki toplama talepleri için akış eşitsizlikleridir ve alt turların oluşmasını engelleyerek her müşterinin toplama taleplerinin karşılanmasını sağlamaktadır. Eş. 23 - Eş. 26, ek karar değişkenleri için sınırları belirler. Eş. 27, bir ayrıt üzerindeki toplam yükün ikincil aracın kapasitesini

geçemeyeceğini ifade eder. Son olarak, Eş. 28 - Eş. 32 işaret kısıtlarıdır.

4. 2A/YS-ETDARP İÇİN SEZGİSEL ALGORİTMA (HEURISTIC ALGORITHM FOR 2E/LRSPD)

NP-Zor problemler sınıfında yer alan 2A/YS-ETDARP için matematiksel model ile orta boyutlu problemler için bile makul sürelerde en iyi çözüme ulaşmak her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle söz konusu problemin çözümü için klasik bir çözüm kurucu algoritma temel alınarak bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Klasik sezgisel algoritmalar basit olmalarının yanı sıra esnekler [45]. Gajpal ve Abad [46], metasezgisel algoritma kullanımının büyük boyutlu problemlerde çözüm süresini artırdığını buna karşın klasik sezgisel algoritmaların kullanımı ile hızlı bir şekilde iyi çözümlere ulaşılabildiğini vurgulamıştır. Johnson vd. [47], çalışmalarında bazı metasezgisellerin başlangıç çözümüne bağlı olabildiğinden bu durumun çözüm kalitesinde istenilen seviyeye ulaşamamasına sebebiyet verebileceğinden bahsetmiştir. Metasezgisel algoritmalar hızlı bir başlangıç olması için klasik sezgisellerden faydalanılabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı klasik bir çözüm kurucu sezgisel olan Clarke-Wright Tasarruf (CW) algoritmasına dayalı bir sezgisel geliştirilmiştir.

Bu bölümde 2A/YS-ETDARP'nin çözümü için geliştirilen çözüm kurucu sezgisel algoritma detaylı olarak verilmektedir. Geliştirilen algoritma CW/2A olarak adlandırılmıştır. Clarke-Wright Tasarruf algoritması basit ve hızlı çözüm üreten bir çözüm kurucu sezgiseldir. Algoritma iki rotanın birleştirilmesiyle elde edilebilecek maliyet tasarrufuna dayalıdır [24]. 2A/YS-ETDARP için önerilen CW/2A iki aşamadan oluşmaktadır. Algoritma önce problemin ikinci aşaması için uygun çözüm üretmekte, bu aşamanın çözümüne göre birinci aşama için çözüm üretmektedir. Algoritmanın adımları Şekil 2'de verilmiştir.

Algoritmanın ilk adımında her müşteri için en yakın ara depoya atanmamanın etkisini gösteren ceza maliyeti p_{ci} ($p_{ci} = c_{ij} - c_{ik}$, $k, j : i$ müşterisine en yakın ve ikinci en yakın ara depolar) hesaplanır. Ara depo kapasitesi uygunluğu kontrol edilerek müşteriler p_{ci} değerlerinin azalan sırasına göre atanabilecekleri en yakın ara depoya atanırlar. Daha önce o ara depoya atanan müşteriler ara deponun kapasitesini doldurduysa p_{ci} değerine göre sıradaki ara depoya müşterinin atanması yapılır. Depo atama işlemi sonucunda müşteri atanmamış ara depo varsa, ilgili ara depo kapatılır. Sonrasında rotalama işlemleri ile devam edilir. Her bir müşteri için kendisi ve atandığı ara depodan oluşan bir rota oluşturularak ikinci aşama için uygun bir çözüm elde edilmiş olur. Bulunan uygun çözüm *İyileştirme* algoritmasıyla iyileştirilir. Bu şekilde ikinci aşamanın çözümü bulunmuş olur. Birinci aşamanın çözümü için ikinci aşama iyileştirilmiş çözümünde açılmış olan ara depolar dikkate alınır. Bu ara depoların her biri için ana depo ve ara depodan

oluşan bir rota oluşturulur. Bulunan bu ilk uygun çözüm *İyileştirme* prosedürü ile iyileştirilir. Son adımda ise birinci ve ikinci aşamanın iyileştirilmiş çözümleri birleştirilir ve amaç fonksiyonu değeri hesaplanır.

Adım 1:	Bütün müşteriler için ceza maliyetlerini (p_{ci}) hesapla $p_{ci} = c_{ij} - c_{ik}$ ($k, j : i$ müşterisine en yakın ve ikinci en yakın ara depolar)
Adım 2:	Müşterileri p_{ci} değerlerinin azalan sırasına göre mümkün olan en yakın ara depoya sırayla ata
Adım 3:	Kendisine müşteri atanmamış ara depoları kapat Müşteri ve atandığı ara depodan oluşan bir rota oluşturularak ikinci aşama için ilk uygun çözümü (S_{A2}) üret. Amaç fonksiyonu değerini $f(S_{A2})$ hesapla
Adım 4:	S_{A2} çözümünü <i>İyileştirme</i> prosedürünü kullanarak iyileştir
Adım 5:	S_{A2} çözümünde açılmış olan her bir ara depo için ara depo ve ana depodan oluşan bir rota oluşturularak birinci aşama için ilk uygun çözümü (S_{A1}) üret. Amaç fonksiyonu değerini $f(S_{A1})$ hesapla
Adım 6:	S_{A1} çözümünü <i>İyileştirme</i> prosedürünü kullanarak iyileştir
Adım 7:	Birinci ve ikinci aşamanın çözümlerini birleştirerek başlangıç çözümünü oluştur ve amaç fonksiyonu değerini hesapla $S_{baş} \leftarrow S_{A1} \cup S_{A2}$, $f(S_{baş}) \leftarrow f(S_{A1}) + f(S_{A2})$

Şekil 2. CW/2A Algoritmasının Adımları (CW/2A Algorithm)

4.1. İyileştirme Prosedürü (Improvement Procedure)

Bu prosedürde Birleştirme, Yer değiştirme ve 2-Opt olmak üzere 3 farklı komşuluk yapısı kullanılmıştır. Komşuluk yapılarının tanımlamalarında bahsedilen düğümler birinci aşama için ara depo, ikinci aşama için müşterilerdir.

Birleştirme: Herhangi iki rota ($R1, R2 : R1 \neq R2$) için R1 rotasının son düğümü ile R2 rotasının ilk düğümü birbirine bağlanarak rota birleştirme işlemi yapılır. Rota birleştirilmesinin gerçekleşmesi için ilgili aşamadaki araç kapasitesinin aşılması gerekmektedir. Birleştirme işleminin yapıldığı rota birinci aşamada ise rotaya ana depo atanması, ikinci aşama ise ara depo atanması yapılır. Ara depo atanması için dört alternatif incelenir: R1'in atandığı ara depo (D1), R2'nin atandığı ara depo (D2), D1 ve D2'den farklı açık bir ara depo, kapalı bir ara depo. Bunlar arasından en düşük maliyetli çözümü veren alternatif yeni çözüm olarak kabul edilir.

Yer değiştirme: Herhangi bir R rotasında iki düğümün yerleri değiştirilir.

2-Opt: Herhangi bir R rotasında ardışık olmayan iki hat silinir. Arada kalan parça rotanın yönü ters çevrilerek ilk ve son rota parçaları ile tekrar bağlanır.

Birleştirme operatörü bu mekanizmalar içinde amaç fonksiyonunda en çok kazanç sağlayan komşuluk mekanizmasıdır. Bir birleştirme işleminden sonra mutlaka bir rota kapatılmakta, amaç fonksiyonu değerinde bir rota sabit maliyeti kadar azalma elde edilmektedir. Ara depo kapatılmasının söz konusu olduğu durumlarda ise ara depo sabit maliyeti kadar daha amaç fonksiyonu değerinde azalma sağlanmaktadır. Bu sebeple Yer değiştirme veya 2-Opt işlemlerinden sonra tekrar Birleştirme mekanizması çalıştırılmıştır. Yer değiştirme ve 2-Opt ile farklı çözümler elde edildikten sonra Birleştirme mekanizmasının uygulanması ile daha iyi amaç fonksiyonu değerine sahip çözümlerin elde edilmesi ihtimali artırılmıştır.

İyileştirme prosedürü her bir komşuluk için mümkün alternatifler içerisinde en iyisini seçip o hareketi gerçekleştirmektedir. Ele alınan problemde eş zamanlı toplama ve dağıtım talepleri söz konusu olduğu için rota yönü önemlidir. Bahsedilen komşu arama mekanizmaları uygulandıktan sonra uygun olmayan rotalar oluşabilmektedir. Bu nedenle komşuluk mekanizmasını uygulamadan önce rota uygunluğu kontrol edilmekte ve uygunsuz ilgili hareket yapılmaktadır. Bu şekilde işlem sayısında ve süresinde azalma sağlanmaktadır. İyileştirme prosedürü Şekil 3'de verilmiştir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR (COMPUTATIONAL RESULTS)

Bu bölümde önerilen sezgisel algoritmanın performansını incelemek için yapılan deneysel çalışma sonuçlarına yer verilmiştir. Deneysel çalışmada Visual Studio 2012 ortamında C++ programlama dili kullanılmıştır. Matematiksel model Concert Technology yardımıyla LP/MIP çözücü CPLEX 12.0 programı kullanılarak çözülmüştür. Tüm koşullar Intel® Core i7-4770 3.40 GHz 8 GB RAM özelliklerinde bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Matematiksel modelin çözümünde iki saat zaman sınırı dikkate alınmıştır. Bu bölümde, test problemleriyle ilgili bilgi verildikten sonra sayısal sonuçlar analiz edilecektir.

5.1. Test Problemleri (Test Problems)

2A/YS-ETDARP yeni bir problem olduğu için probleme özgü üretilmiş bir veri seti literatürde bulunmamaktadır. Bu nedenle, Nguyen vd. [26-28] çalışmalarında kullanılan 2A/YS-ARP test kümesi üzerinde Salhi ve Nagy [48] ve Angelelli ve Mansini [49] tarafından önerilen talep ayrıştırma yöntemleri uygulanarak yeni test kümesi oluşturulmuştur. 2A/YS-ETDARP için üretilen test kümesinde 3, 5 veya 10 ikincil tesis, 10, 15, 20, 25, 50 veya 100 müşteri bulunmaktadır. 10, 15 ve 20 müşterili küçük boyutlu problemler, 5 adet ikincil tesise sahip 25 müşterilik veri kümesinden orijinal veri setindeki sırasıyla ilk 10, 15 ve 20 müşteri verisi kullanılarak oluşturulmuş ve ikincil tesis

sayısı 3 olarak alınmıştır. 50 ve 100 müşterili test problemlerinde ikincil tesis sayısı 5 ve 10 olarak alınmıştır. Her problem boyutu için ikincil tesis sayısına bağlı olarak 4 test problemi vardır. Birincil araçların kapasitesi 750 veya 850 birimdir; ikincil araçların kapasitesi 100 veya 150 birimdir. Talepler ortalaması 15 varyansı 25 olan normal dağılıma uygun olarak üretilmektedir. Uzaklıklar Öklid uzaklığı olarak kabul edilmiştir. Birinci aşamadaki uzaklıklar hesaplanırken hesaplanan değer iki katı alınmıştır.

Müşteriler için hem dağıtım hem de toplama taleplerini üretmek amacıyla birinci yaklaşım olarak Salhi ve Nagy [48]'deki talep ayrıştırma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde göre müşteri düğümlerinin x ve y koordinatlarına bağlı $r_i = \min(x_i / y_i; y_i / x_i)$ oranı hesaplanmıştır. q_i , i müşterisinin orijinal talebi olmak üzere dağıtım ve toplama talepleri sırasıyla şu şekilde hesaplanmıştır: $d_i = r_i * q_i$ ve $p_i = q_i - d_i$. Bu yöntem ile elde edilen veri kümesine X tipi problem adı verilmiştir. X tipinde elde edilen toplama ve dağıtım taleplerinin yerlerinin değiştirilmesi ve taleplerin bir sonraki müşteriye kaydırılması ile de Y tipi problemler üretilmiştir. Angelelli ve Mansini [49] tarafından önerilen talep ayrıştırma yönteminde ise orijinal talep değerleri dağıtım talebi olarak kabul edilir. Toplama talepleri ise müşteri numarasının tek veya çift olmasına göre şu şekilde hesaplanır: $d_i = q_i$, i çift ise $p_i = \lfloor (1-\gamma)q_i \rfloor$, i tek ise $p_i = \lfloor (1+\gamma)q_i \rfloor$. W tipi problemlerde $\gamma = 0,8$ alınırken Z tipi problemlerde $\gamma = 0,2$ olarak alınmaktadır. Bu ayrıştırma yöntemleri kullanılarak her bir veriden 4 farklı problem verisi türetilmiştir. 64 (4x4x4 tane 10, 15, 20 ve 25 müşterili) küçük, 32 (4x4 tane 50 müşteri ve 5 ikincil tesisli, 4x4 tane 50 müşteri ve 10 ikincil tesisli) orta ve 32 büyük boyutlu problem olmak üzere toplamda 128 problem elde edilmiştir.

5.2. Matematiksel Modelin Performans Analizi (Performance Analysis of Mathematical Model)

Bu bölümde 2A/YS-ETDARP için önerilen matematiksel modelin performansı incelenerek eniyi çözümün elde edilebileceği problem boyutu belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, müşteri sayısının 10 ile 25 arasında, ara depo sayısının 3 ve 5 olduğu küçük boyutlu test problemleri dikkate alınmıştır. Matematiksel modelin performansını incelemek için aşağıdaki performans ölçütleri dikkate alınmıştır [14]:

- EÇUPS: 7200 sn içerisinde matematiksel model ile eniyi çözüme ulaşılan problem sayısı
- OYSD: Ortalama yüzde sapma değeri

YSD, her problem için 7200 saniye içerisinde matematiksel model ile bulunan üst sınır (Z^{US}) ile alt sınır (Z^{AS}) arasında yüzde sapma değerine dayalı olarak hesaplanmaktadır. YSD, (33) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu değer bulunan çözümün optimale uzaklığının göstergesidir.

Adım 1:	$S(S_{A2}$ veya $S_{A1})$ çözümü içerisindeki tüm rota çiftleri için birleştirme mekanizmasını uygula Repeat $f(S_{eniye}) \leftarrow \infty$ S çözümündeki tüm rota çiftleri $(R_1, R_2 : R_1 \neq R_2)$ için - Tüm alternatifler arasından eniyi S' çözümünü üret ve amaç fonksiyonu değerini $f(S')$ hesapla - $(f(S') < f(S_{eniye}))$ ise $S_{eniye} \leftarrow S'$ ve $f(S_{eniye}) \leftarrow f(S')$ $(f(S_{eniye}) < f(S))$ ise $S \leftarrow S_{eniye}$ ve $f(S) \leftarrow f(S_{eniye})$ Until $(f(S_{eniye}) = \infty)$
Adım 2:	S içerisindeki bütün rotalardaki düğüm çiftleri için yer değiştirme mekanizmasını uygula Repeat $f(S_{eniye}) \leftarrow \infty$ S çözümü içindeki her bir rota (R) için R içindeki tüm düğüm çiftleri $(i, j : i \neq j)$ için - R içindeki i ve j düğümlerinin yerlerini birbirleriyle değiştirerek S' çözümünü üret ve amaç fonksiyonu değerini $f(S')$ hesapla - $(f(S') < f(S_{eniye}))$ ise $S_{eniye} \leftarrow S'$ ve $f(S_{eniye}) \leftarrow f(S')$ $(f(S_{eniye}) < f(S))$ ise $S \leftarrow S_{eniye}$ ve $f(S) \leftarrow f(S_{eniye})$ Until $(f(S_{eniye}) = \infty)$
Adım 3:	S içerisindeki bütün rotalardaki düğüm çiftleri için 2-Opt prosedürünü uygula Repeat $f(S_{eniye}) \leftarrow \infty$ S çözümü içindeki her bir rota (R) için R içindeki tüm hat çiftleri $((i, i+1), (j, j+1) : i+1 < j)$ için - R içerisinde $(i, i+1), (j, j+1)$ hatlarını silip yerine $(i, j), (i+1, j+1)$ hatlarını ekleyerek ve $(i+1...j)$ arasındaki parça rotanın yönünü ters çevirerek S' çözümünü üret ve amaç fonksiyonu değerini $f(S')$ hesapla - $(f(S') < f(S_{eniye}))$ ise $S_{eniye} \leftarrow S'$ ve $f(S_{eniye}) \leftarrow f(S')$ $(f(S_{eniye}) < f(S))$ ise $S \leftarrow S_{eniye}$ ve $f(S) \leftarrow f(S_{eniye})$ Until $(f(S_{eniye}) = \infty)$
Adım 4:	Eğer Adım 2 veya Adım 3'de bir iyileşme gerçekleştiyse Adım 1'e git değilse prosedürü sonlandır

Şekil 3. 2A/YS-ETDARP için iyileştirme prosedürü (Improvement Procedure for 2E-LRSPD)

$$YSD = \left(\frac{Z^{OS} - Z^{AS}}{Z^{OS}} \right) \times 100 \quad (33)$$

OYSD, her problem tipi için YSD'lerin ortalamasıdır.

- OÇS: Ortalama çözüm süresi (saniye/second)

OÇS, her problem tipi için çözüm sürelerinin ortalamasıdır.

Tablo 4'te sayısal analiz sonuçları verilmektedir. Tablo 4'ün ilk sütununda sırasıyla, müşteri sayısı, ara depo sayısı ve problem tipi verilmektedir. Son üç sütunda ise sırasıyla EÇUPS, OYSD ve OÇS yer almaktadır. Her bir problem

tipinden 4 farklı problem çalıştırılmış ve ortalama sonuçları tabloda verilmiştir. Tablo 4'ten görüldüğü gibi matematiksel modelin CPLEX ile tamsayılı çözümüyle küçük boyutlu 64 problemin 32'sinde 7200 s içerisinde eniyi çözüme ulaşılmıştır. 10 müşterili problem grubundaki tüm problemler için ortalama 4,4 saniyede eniyi çözüme bulunmuştur. 15 müşterili problem grubu için çalıştırılan 16 problemin 13'ünde ortalama 1915,82 saniyede, 20 müşterili problem grubu için 16 problemin 3'ünde ortalama 6115,33 saniyede eniyi çözüm elde edilmiştir. 7200 saniyede 25 müşterili problemlerin hiçbiri için eniyi çözüme ulaşılamamıştır ve OYSD değeri bu problem grubu için %23,2'dir. Problem boyutu büyüdükçe OYSD değerlerinin arttığı Tablo 4'ten görülmektedir. Talep miktarının daha

Tablo 4. Küçük boyutlu problemler için matematiksel model test sonuçları (Mathematical model test results for small-size problems)

Müşteri Sayısı	Ara Depo Sayısı	Problem Tipi	EÇUPS	OYSD	OÇS
10	3	X	4/4	0	3,51
		Y	4/4	0	3,77
		W	4/4	0	5,16
		Z	4/4	0	5,33
Ortalama / (Toplam)			(16/16)	0	4,44
15	3	X	4/4	0	246,90
		Y	4/4	0	90,60
		W	3/4	2,78	3122,55
		Z	2/4	4,03	4203,25
Ortalama / (Toplam)			(13/16)	1,70	1915,82
20	3	X	1/4	4,98	5688,04
		Y	2/4	3,10	4373,28
		W	0/4	14,35	7200
		Z	0/4	14,61	7200
Ortalama / (Toplam)			(3/16)	9,26	6115,33
25	5	X	0/4	13,36	7200
		Y	0/4	18,67	7200
		W	0/4	30,56	7200
		Z	0/4	30,23	7200
Ortalama / (Toplam)			(0/16)	23,20	7200
Genel Ortalama / Genel Toplam			(32/64)	8,54	3808,90

yüksek olduğu W-Z tipi problemlerde çözüm için harcanan zamanın X-Y tipi problemlere göre fazla olduğu görülmüştür. 25 müşterili problem grubundaki W-Z tipi problemler için OYSD %30'a kadar çıkmaktadır. Talep miktarı arttıkça problem zorlaşmakta ve matematiksel modelin çözümü için harcanan süre de artmaktadır. NP-Zor problem sınıfında yer alan bu problemin küçük boyutlularında bile sadece yarısında 7200s içerisinde eniyi çözüme ulaşılabilmektedir. Bu nedenle probleme kısa süreler içerisinde çözüm üretebilmek için bir sezgisel algoritma geliştirme ihtiyacı doğmuştur. Bir sonraki bölümde problem için geliştirilen sezgisel algoritmanın test sonuçları verilecektir.

5.3. Sezgisel Algoritmanın Performans Analizi (Performance Analysis of Heuristic Approach)

2A/YS-ETDARP için Clarke-Wright algoritmasına dayalı geliştirilen CW/2A algoritmasının performansını değerlendirmek için aşağıdaki performans ölçütleri kullanılmıştır.

- OYSD: Ortalama Yüzde Sapma Değeri

YSD, Z^{US} matematiksel modelin CPLEX ile çözümünde çözüm süresi içerisinde bulunan eniyi üst sınır değeri ve Z^{CW} sezgisel algoritma tarafından bulunan amaç fonksiyonu değerine bağlı olarak hesaplanır [3]. YSD'nin hesabı Eş. 34'te verilmiştir.

$$YSD = 100 * \left(\frac{Z^{CW} - Z^{US}}{Z^{US}} \right) \quad (34)$$

OYSD, ilgili problem tipi için hesaplanan YSD'lerin ortalamasıdır.

- EKYS: En Küçük Yüzde Sapma Değeri: Problem tipi için hesaplanan en küçük YSD'dir.
- EBYSD: En Büyük Yüzde Sapma Değeri: Problem tipi için hesaplanan en büyük YSD'dir.
- OÇS: Ortalama Çözüm Süresi (saniye/second): OÇS, her problem tipi için çözüm sürelerinin ortalamasıdır.

CW/2A algoritmasının test sonuçları küçük boyutlu problemler için Tablo 5'te, orta ve büyük boyutlu problemler için ise Tablo 6'da verilmiştir. Tablolarda ilk 3 sütunda problem grubunun müşteri sayısı, ara depo sayısı ve problem tipi verilmiştir. Dördüncü sütunda OÇS, beşinci sütunda OYSD, altıncı sütunda EKYS, yedinci sütunda ise OÇS verilmiştir. Tabloda her bir problem tipi için 4 problemin ortalama değerleri sunulmuştur. 7200 saniyelik süre içerisinde matematiksel modelin tamsayılı çözümü ile küçük boyutlu problemlerin tamamı için üst sınır değeri bulunurken büyük boyutlu problemlerden 100 müşterili problem grubunda bazı problemler için üst sınır değeri bulunamamıştır. Üst sınır değeri olmayan problemler OYSD hesabına dâhil edilmemiştir. Bu nedenle Tablo 6'ya Tablo 5'ten farklı olarak ÜSBPS başlıklı bir sütun eklenmiştir. Bu sütunda ilgili problem grubu için üst sınır değeri bulunan problem sayısı verilmiştir. Örneğin 3/4 değeri o problem grubunda toplam 4 problem olduğunu ve 3'ü için üst sınır değerinin elde edildiğini ifade eder.

Tablo 5 ve Tablo 6'da OÇS sütunu incelendiğinde tüm problem grupları için harcanan sürenin 1 saniyenin altında olduğu görülmektedir. Tablo 5'te OYSD sonuçları incelendiğinde 10 müşterili problemler için OYSD'nin %16,83, 15 müşterili problemler için %20,47, 20 müşterili

Tablo 5. Küçük boyutlu problemler için CW/2A sayısal sonuçları (Computational results of CW/2A for small sized problems)

Müşteri Sayısı	Ara Depo Sayısı	Problem Tipi	OÇS	OYSD	EKYSD	EBYSD
10	3	X	0	15,44	0	34,60
		Y	0	15,44	0	34,60
		W	0	19,21	0	31,40
		Z	0	17,22	0	29,40
Ortalama			0	16,83	0	32,50
15	3	X	0	14,67	2,73	29,97
		Y	0	14,61	0	33,19
		W	0	26,44	17,55	38,87
		Z	0	26,17	30,00	38,87
Ortalama			0	20,47	12,57	35,22
20	3	X	0	23,46	12,68	31,50
		Y	0	17,44	0	32,60
		W	0	22,69	13,94	31,01
		Z	0,01	18,60	1,31	31,01
Ortalama			0	20,55	6,98	31,53
25	5	X	0,01	20,58	4,99	39,87
		Y	0,01	20,27	3,82	41,09
		W	0,02	12,14	1,02	25,04
		Z	0,02	7,10	-7,91	21,70
Ortalama			0,01	15,02	0,48	31,93
Genel Ortalama			0,01	18,22	5,01	32,79

Tablo 6. Orta ve büyük boyutlu problemler için CW/2A sayısal sonuçları (Computational results of CW/2A for medium- and large- size problems)

Müşteri Sayısı	Ara Depo Sayısı	Problem Tipi	OÇS	OYSD	EKYSD	EBYSD	ÜSBPS
50	5	X	0,03	-13,28	-20,41	-0,53	4/4
		Y	0,03	-11,10	-19,91	-3,04	4/4
		W	0,04	-22,68	-25,26	-19,96	4/4
		Z	0,03	-15,47	-21,16	-8,16	4/4
Ortalama / (Toplam)			0,03	-15,63	-21,68	-7,92	(16/16)
50	10	X	0,05	-6,90	-14,17	0,34	4/4
		Y	0,06	4,20	-5,02	8,03	4/4
		W	0,05	-5,81	-18,70	6,34	4/4
		Z	0,06	-15,28	-27,40	-2,27	4/4
Ortalama / (Toplam)			0,06	-5,95	-16,32	3,11	(16/16)
100	5	X	0,15	-31,73	-33,72	-28,25	4/4
		Y	0,16	-34,77	-40,96	-30,47	4/4
		W	0,16	-42,85	-48,94	-35,08	4/4
		Z	0,15	-43,07	-45,10	-40,12	4/4
Ortalama / (Toplam)			0,15	-38,11	-42,18	-33,48	(16/16)
100	10	X	0,41	-45,07	-67,02	-27,76	3/4
		Y	0,42	-69,09	-81,54	-43,24	4/4
		W	0,39	-51,81	-63,38	-40,24	2/4
		Z	0,39	-66,81	-70,81	-62,81	2/4
Ortalama / (Toplam)			0,40	-58,19	-70,69	-43,51	(11/16)
Genel Ortalama / (Toplam)			0,16	-29,47	-37,72	-20,45	(59/64)

problemler için %20,55 ve 25 müşterili problemler için %15,02 olduğu görülmüştür. Küçük boyutlu problemler için en iyi OYSD sonucuna 25 müşterili problem grubunda ulaşılmıştır. Ortalama EKYS D %0 ile %12,57 aralığında değişmektedir. Ortalama EBYSD ise %31,53 ile %35,22 arasında değerler almaktadır. EKYS D ve EBYSD değerlerinden CW/2A algoritmasının küçük boyutlu problemlerin bir kısmında (8 tanesinde) matematiksel

modelin tamsayılı çözümüyle bulunan üst sınır değerine ulaştığı gözlenmiştir. CW/2A algoritması problem büyüklüğü arttıkça talep miktarının daha yüksek olduğu W-Z tipi problemlerde daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Küçük boyutlu problemler için genel ortalama sonuçları incelendiğinde OÇS'nin 1 saniyenin altında OYSD'nin %18,22, ortalama EKYS D'nin %5,01, ortalama EBYSD'nin %32,79 olduğu görülmüştür.

Tablo 6 genel ortalama OYSD sonuçları incelendiğinde CW/2A'nın orta ve büyük boyutlu problemlerde matematiksel model ile elde edilen üst sınırdan ortalama olarak %29,47 daha iyi çözümler bulduğu görülmektedir. Algoritma ile 50 müşterili 5 ara depolu problemlerde %15,63, 50 müşterili 10 ara depolu problemlerde %5,95, 100 müşterili 5 ara depolu problemlerde %38,11, 100 müşterili 10 ara depolu problemlerde %58,19 daha düşük maliyetli çözümlere ulaşılmıştır. Buna karşın çözüm süresinin tüm orta ve büyük boyutlu problemler için 1 saniyenin altında olduğu görülmüştür. EKYS ve EBYSD sonuçları incelendiğinde 50 müşterili 5 ara depolu, 100 müşterili 5 ve 10 ara depolu problemlerin tamamında matematiksel model ile bulunan üst sınır değerinden daha iyi sonuçlara ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Talep ayrıştırma yöntemine göre sonuçlar incelendiğinde talebin daha yüksek olduğu W-Z tipi problemlerde CW/2A algoritmasının daha etkin olduğu görülmüştür.

Tablo 5 ve Tablo 6 birlikte ele alındığında problem boyutu ve problem zorluğu arttıkça CW/2A algoritması ile bulunan çözümlerin matematiksel modelin bulduğu çözümlere kıyasla iyileştiği görülmüştür. Tablo 5'te hesaplanan OYSD değerleri pozitifken Tablo 6'da negatife dönmüş, bir başka ifade ile CW/2A algoritmasıyla matematiksel modelin 2 saat içerisinde bulduğu çözümden daha iyi çözümlere ulaşılmıştır. Algoritma ile 1 saniyeden daha kısa sürede tüm problemler için iyi çözümlere ulaşılabilmektedir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada iki aşamalı yer seçimi ve eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi 2A/YS-ETDARP önerilmiştir. Problem her bir aşamada dağıtım ve toplama aktivitelerini içermektedir. Bunun yanı sıra ikincil tesisler ve tüm araçlar kapasitelidir. 2A/YS-ETDARP'yi çözmek için düğüm tabanlı karışık tam sayılı bir matematiksel model önerilmiştir. Orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için ise çözüm kurucu bir sezgisel olan Clarke-Wright algoritmasını temel alan bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda küçük boyutlu problemler için matematiksel modelin çözümüyle kısa sürelerde en iyi sonuçlara ulaşılabildiği ancak problem boyutu arttıkça çözümün zorlaştığı görülmüştür. Geliştirilen sezgisel algoritma ile orta ve büyük boyutlu problemler için 1 saniyeden daha kısa sürede iyi kalitede çözümler üretilebilmiştir. Hem süre hem de çözüm kalitesi açısından CW/2A algoritmasının orta ve büyük boyutlu problemlerde matematiksel modelin tam sayılı çözümü ile elde edilen çözüme göre daha iyi kalitede çözümler ürettiği görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda en iyi çözüme daha yakın sonuçların elde edilmesi için metasezgisel yöntemlerden faydalanılabilir. Bu çalışmada geliştirilmiş olan sezgisel yöntem algoritmaya başlangıç çözümü vermek için kullanılabilir. Son yıllarda sezgisel yöntemlerin ve kesin çözüm yöntemlerinin birlikte kullanıldığı matsezigisellerin popülerliği artmaktadır [50]. Matsezigisellerin başarılı sonuçlar verdiği lojistik problemler üzerine pek çok çalışma

literatürde mevcuttur [50-54]. Matsezigisel kullanımı 2A/YS-ETDARP için orta ve büyük boyutlu problemlerde optimale daha yakın sonuçların elde edilmesi için bir matsezigisel yaklaşım geliştirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Drezner, Z. Steiner, G., Wesolowsky, G.O., One-Facility Location with Rectilinear Tour Distances, *Naval Research Logistics Quarterly* 32, 391-405, 1985.
2. Köksalan, M., Süral, H., Kırca, O., A Location-Distribution Application for a Beer Company, *European Journal of Operational Research*, 80, 16-24, 1995.
3. Karaoğlan, İ., Altıparmak, F., A Memetic Algorithm for the Capacitated Location-Routing Problem with Mixed Backhauls, *Computers and Operations Research*, 55, 200-216, 2015.
4. Prodhon, C., Prins, C., A Survey on Recent Research on Location-Routing Problems, *European Journal of Operations Research*, 238, 1-17, 2014.
5. Salhi, S. and Rand, G., The Effect of Ignoring Routes When Locating Depots, *European Journal of Operational Research*, 39, 150-156, 1989.
6. Barış, S., Facility Location Decisions Under Vehicle Routing Considerations, Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2002.
7. Karaoğlan, İ., Altıparmak, F., Kara, İ., Dengiz, B., A Branch and Cut Algorithm for the Location-Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery, *European Journal of Operational Research*, 211(2), 318-332, 2011.
8. Min, H., Jayaraman, V., Srivastava, R., Combined Location-Routing Problems: A Synthesis and Future Research Directions, *European Journal of Operational Research*, 108, 1-15, 1998.
9. Nagy, G., Salhi, S., Location-Routing: Issues, Models and Methods, *European Journal of Operational Research*, 177, 649-672, 2007.
10. Drexler, M., Schneider, M., A Survey of Location Routing Problem, Technical Report LM-2013-03, 2013.
11. Crainic, T. G., Sgalambro, A., Service Network Design Models for Two-Tier City Logistics, *Optimization Letters*, 8, 1375-1387, 2014.
12. Boccia, M., Crainic, T.G., Sforza, A., Sterle, C., Location-Routing Models for Designing a Two-Echelon Freight Distribution System, Technical Report 2011-06, CIRRELT, Montreal, 2011.
13. Nagy, G., Salhi, S., Heuristic Algorithms for Single and Multiple Depot Vehicle Routing Problems with Pickups and Deliveries, *European Journal of Operational Research*, 162, 126-141, 2005.
14. 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.
15. Aydoğdu B., Özyörük B., Mathematical Model and Heuristic Approach for Solving Dynamic Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and

- Delivery: Random Iterative Local Search Variable Neighborhood Descent Search, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 563-580, 2020.
16. Bayrak A., 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), 469-480, 2017.
 17. Hornstra, R., Silva, A., Roodbergen K. J., Coelho, L. C., The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery and Handling Costs, *Computers and Operations Research*, 115, 104858, 2020.
 18. Can Atasagun G., Karaoğlan İ., A Mathematical Model for the Time Dependent Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 1743-1756, 2019.
 19. Parragh, S.N., Doerner, K.F., Hartl, R.F., A Survey on Pickup and Delivery Problems Part I: Transportation Between Customers and Depot, *Journal für Betriebswirtschaft*, 58 (1), 21-51, 2008.
 20. Berbeglia, G., Cordeau, J., Gribkovskaia, I., Laporte, G., Static Pickup and Delivery Problems: A Classification Scheme and Survey, *Top*, 15, 1-31, 2007.
 21. Koç, Ç., Laporte, G., Tükenmez, İ., A Review of Vehicle Routing with Simultaneous Pickup and Delivery, *Computers and Operations Research*, 122, 104987, 2020.
 22. Belgin, Ö., Karaoğlan, İ., Altıparmak, F., Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery: Mathematical Model and Heuristic Approach, *Computers & Industrial Engineering*, 115, 1-16, 2018.
 23. Demircan-Yıldız, E. A., Karaoğlan, İ., Altıparmak, F., Two Echelon Location Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery: Mixed Integer Programming Formulations and Comparative Analysis, *Lecture Notes on Computer Science*, 9855, Editör: Paiaş, A., Ruthmair, M., Voß, Springer, 275-289, 2016.
 24. Clarke, G., Wright, J. V., Scheduling of Vehicles from Central Depot to a Number of Delivery Points, *Operations Research*, 12, 568-581, 1964.
 25. Boccia, M., Crainic, T.G., Sforza, A., Sterle, C., A Metaheuristic for a Two Echelon Location-Routing Problem, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 6049, Editör: Festa, P., Berlin, 288-301, 2010.
 26. Nguyen VP., Prins C., Prodhon C., A Multi-Start Evolutionary Local Search for the Two-Echelon Location Routing Problem, *Lecture Notes in Computer Science*, 6373, Editör: Blesa M.J., Blum C., Raidl G., Roli A., Sampels M., Springer, Berlin, Heidelberg, 88-102, 2010.
 27. Nguyen, V.P., Prins, C., Prodhon, C., A Multi Start Iterative Local Search with Tabu List and Path Relinking for the Two-Echelon Location Routing Problem, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25, 56-71, 2012.
 28. Nguyen, V.P., Prins, C., Prodhon, C., Solving the Two-Echelon Location Routing Problem by a GRASP Reinforced by a Learning Process and Path Relinking, *European Journal of Operational Research*, 216, 113-126, 2012.
 29. Nikbakhsh, E., Zegordi, S., A Heuristic Algorithm and a Lower Bound for the Two-Echelon Location-Routing Problem with Soft Time Window Constraints, *Scientia Iranica Transaction E: Industrial Engineering*, 17, 36-47, 2010.
 30. Contardo, C., Hemmelmayr, V., Crainic, T.G., Lower and Upper Bounds for the Two-Echelon Capacitated Location-Routing Problem, *Computers & Operations Research*, 39, 3185-3199, 2012.
 31. Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., Devika, K., Two Echelon Multiple Vehicle Location-Routing Problem with Time Windows for Optimization of Sustainable Supply Chain Network of Perishable Food, *International Journal of Production Economics*, 152, 9-28, 2014.
 32. Bala, K., Brcanov, D., Gvozdenovic, N., Two-Echelon Location Routing Synchronized with Production Schedules and Time Windows, *Central European Journal of Operations Research*, 25, 525-543, 2017.
 33. Pichka, K., Bajgirani, A.H., Petering, M.E.H., Jang, J., Yue, X., The Two Echelon Open Location Routing Problem: Mathematical Model and Hybrid Heuristic, *Computers & Industrial Engineering*, 121, 97-112, 2018.
 34. Veenstra, M., Roodbergen, K., Coelho, L., Zhu, S., A Simultaneous Facility Location and Vehicle Routing Problem Arising in Healthcare Logistics in the Netherlands, *European Journal of Operational Research*, 268, 703-715, 2018.
 35. Wang, Y., Assogba, K., Liu, Y., Ma, X., Xu, M., Wang, Y., Two-Echelon Location-Routing Optimization with Time Windows Based on Customer Clustering, *Expert Systems with Applications*, 104, 244-260, 2018.
 36. Grüler, A., Juan, A., Klüter, A., Rabe, M. A Simulation-Optimization Approach for the Two-Echelon Location Routing Problem Arising in the Creation of Urban Consolidation Centres, *Simulation in Produktion und Logistik*, 17, 129-138, 2017.
 37. Darvish, M., Archetti, C., Coelho, L., Speranza, M. G., Flexible Two-Echelon Location Routing Problem, *European Journal of Operational Research*, 277, 1124-1136, 2019.
 38. Yu, Z., Zhou, Y., Liu, X.F., The Two-Echelon Multi-Objective Location Routing Problem Inspired by Realistic Waste Collection Applications: The Composable Model and a Metaheuristic Algorithm, *Applied Soft Computing Journal*, Applied Soft Computing Journal, 94, 106477, 2020.
 39. Karaoğlan, İ., Altıparmak, F., Kara, İ., Dengiz, B., The Location-Routing Problem with simultaneous Pickup and Delivery: Formulations and a Heuristic Approach, *Omega*, 40 (4), 465-477, 2012.
 40. Yu, V., Lin, S., Multi-start Simulated Annealing Heuristic for the Location Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Applied Soft Computing*, 24, 284-290, 2014.

41. Yu, V., Lin, S., Solving the Location-Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery by Simulated Annealing, *International Journal of Production Research*, 54 (2), 526-549, 2016.
42. Abedinzadeh, S., Ghoroghi, A., Afshar, S., Barkhordari, M., A Two-Echelon Green Supply Chain with Simultaneous Pickup and Delivery, *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 3 (2), 12-18, 2017.
43. Rahmani, Y., Cherif-Khettaf, W.R., Oulamara, A., The Two-Echelon Multi-Products Location-Routing Problem with Pickup and Delivery: Formulation and Heuristic Approaches, *International Journal of Production Research*, 54 (4), 999-1019, 2016.
44. Fan, H., Wu, J., Li, X., Jiang, X., Presenting a Multi-Start Hybrid Heuristic for Solving the Problem of Two-Echelon Location-Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery (2E-LRPSPD), *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 9743841, 2020.
45. Cordeau, J.F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.Y., and Semet, F., A Guide to Vehicle Routing Heuristic, *The Journal of the Operational Research Society*, 53, 512-522, 2002.
46. Gajpal, Y., Abad, P., Saving-Based Algorithms for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery, *The Journal of the Operational Research Society*, 61, 10, 1498-1509, 2010.
47. Johnson, D.S., Aragon, C.R., McGeogh, L.A., and Schevon, C., Optimization by Simulated Annealing: An Experimental Evaluation: Part 1. Graph Partitioning, *Operations Research*, Cilt 37, 865-891, 1989.
48. 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, 1034-42, 1999.
49. Angelelli, E., Mansini, R., The Vehicle Routing Problem with Time Windows and Simultaneous Pickup and Delivery, *Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management*, 519, Editörler: Klose, A., Speranza, M. G., Van Wassenhove, L. N., Springer, Berlin, 249-267, 2002.
50. Archetti, C., Speranza M. G., A Survey on Matheuristics for Routing Problems, *EURO Journal on Computational Optimization*, 2, 223-246, 2014.
51. Yıldırım U.M., Çatay B., An Ant Colony-Based Matheuristic Approach for Solving a Class of Vehicle Routing Problems, *Computational Logistics*, ICCL 2015, *Lecture Notes in Computer Science*, 9335, Editörler: Corman F., Voß S., Negenborn R. , Springer, Cham, 2015.
52. Boschetti, M., Maniezzo, V., A Set Covering Based Matheuristic for a Real-World City Logistics Problem, *International Transactions in Operations Research*, 22, 169-196, 2015.
53. Kramer, R., Subramanian, A., Vidal, T., Cabral, L., A Matheuristic Approach for the Pollution-Routing Problem, *European Journal of Operations Research*, 243, 523-539, 2015.
54. Mancini, S., A Real-Life Multi Depot Multi Period Vehicle Routing Problem with a Heterogeneous Fleet: Formulation and Adaptive Large Neighborhood Search based Matheuristic, *Transportation Research Part C*, 70, 100-112, 2016.