



*Araştırma Makalesi / Research Article*

## İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi: Temel Yaklaşımlar ve Konvansiyonel Araç Rotalama Problemi ile Karşılaştırmalar\*

Ergül Kısa Toğrul<sup>1</sup>, Kazım Barış Atıcı<sup>2</sup>, Aydın Ulucan<sup>3</sup>

### Öz

Dağıtım ağının birden fazla kademeye bölüdüğü çok-aşamalı dağıtım sistemleri, işletmelerin hem ilk kademelerde gerçekleştirdikleri büyük miktarlardaki sevkiyatlardan hem de her kademedeki araç kapasitelerinin etkin kullanımından doğan ölçek ekonomilerinden faydalanmalarını ve yoğun kentsel alanlarda gerçekleştirilen dağıtım faaliyetlerinden kaynaklanan çevresel ve sosyal etkilerin azaltılmasını sağlayabilmektedir. Bu bağlamda, akademik literatürde de çok-kademeli dağıtım sistemlerinin modellenmesine yönelik çalışmalar da artmaktadır. Bu çalışmanın amacı, çok-kademeli dağıtım sistemleri kapsamında yer alan İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemine (2A-ARP) kapsamlı bir bakış açısı sunmak ve tek-kademeli dağıtım sistemlerine göre avantajlarını irdelemektir. Bu amaçlar doğrultusunda, literatürde yer alan 2A-ARP uygulamaları çözüm yaklaşımları açısından sınıflandırılarak metodolojik detayları tasnif edilmekte, daha sonra, bir süpermarket zincirinin verisinden hareketle oluşturulan uygulama tasarımı ile 2A-ARP modellemesi klasik Araç Rotalama Problemi (ARP) ile mesafe, yakıt tüketimi, süre ve maliyet gibi dört ayrı amaç fonksiyonu ile kıyaslamaya tabi tutulmaktadır. Kıyaslamalarda, kapasite, talep, araç sayısı ve araç kapasitesi parametrelerindeki değişimin etkisini analiz etmek amacıyla 25 senaryo ile duyarlılık analizi yapılmıştır. Tasarlanan uygulama varsayımları altında elde edilen sonuçlar, 2A-ARP modelinin ARP modeline göre daha maliyetli olmasına rağmen, süre, mesafe ve yakıt tüketimi gibi faktörler açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Lojistik, Dağıtım, Araç Rotalama Problemi (ARP), İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (2A-ARP).

## Two-Echelon Vehicle Routing Problem: Review and Comparisons with Conventional Vehicle Routing Problem

### Abstract

Multi-stage distribution systems, in which the distribution network is divided into more than one level, can enable businesses to benefit from the economies of scale arising from both large quantities of shipments at the first stages and the efficient use of vehicle capacities at all levels, and to reduce environmental and social impacts from distribution activities carried out in dense urban areas. In this context, there is an increasing interest in modeling multi-stage distribution systems in the academic literature. This research aims to provide a comprehensive look at the Two-Echelon Vehicle Routing Problem (2E-VRP) that is within the scope of multi-stage distribution systems and to examine its advantages over single-stage distribution systems. In line with these purposes, we classify 2E-VRP applications in terms of solution approaches and their methodological details, then, we design an application and compare 2E-VRP modeling with the classical Vehicle Routing Problem (VRP) using four different objective functions like distance, fuel consumption, time and cost. A sensitivity analysis is conducted with 25 scenarios to analyze the effect of changes in capacity, demand, number of vehicles, and vehicle capacity parameters. The results reveal that although the 2E-VRP model is costlier than the VRP model, it is more advantageous in terms of factors such as time, distance, and fuel consumption.

**Keywords:** Logistics, Distribution, Vehicle Routing Problem (VRP), Two-Echelon Vehicle Routing Problem (2E-VRP).

\*Bu çalışma Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı'nda Kazım Barış Atıcı danışmanlığında Ergül Kısa Toğrul tarafından "Araç Rotalama Problemi ile İki-Aşamalı Araç Rotalama Probleminin Karşılaştırılması ve Lokasyon Seçimi İçin Bir Hibrit Model Önerisi" başlığı ile tamamlanarak 16.06.2021 tarihinde savunulan Doktora tezinden türetilmiştir.

<sup>1</sup> Corresponding Author (Sorumlu Yazar), Arş.Gör.Dr., Hitit Üniversitesi, İşletme Bölümü, [ergultogrul@hitit.edu.tr](mailto:ergultogrul@hitit.edu.tr), <https://orcid.org/0000-0002-7755-5173>

<sup>2</sup> Doç. Dr., Hacettepe Üniversitesi, İşletme Bölümü, [kba@hacettepe.edu.tr](mailto:kba@hacettepe.edu.tr), <https://orcid.org/0000-0003-0786-9641>

<sup>3</sup> Prof. Dr., Hacettepe Üniversitesi, İşletme Bölümü, [aulucan@hacettepe.edu.tr](mailto:aulucan@hacettepe.edu.tr), <https://orcid.org/0000-0002-0439-2211>

**Atf:** Kısa Toğrul, E., Atıcı, K.B. ve Ulucan, A. (2022). İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi: Temel Yaklaşımlar ve Konvansiyonel Araç Rotalama Problemi ile Karşılaştırmalar. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 40 (2), 368-403.

## GİRİŞ

E-ticaretin hızlı gelişimi ve müşterilerin daha hızlı teslimat isteği ile birlikte lojistik hizmetleri günlük yaşamın önemli bir parçası olmuştur (Wang vd., 2017). Gün geçtikçe taşınan ürün miktarının artması ile teslimat faaliyetleri özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde araç trafiğini arttıran faktörlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır (Gonzalez-Feliu vd., 2008; Savelsbergh ve Van Woensel, 2016). Öte yandan, tüm dünyada, şehirlerin refahını olumsuz etkileyen trafik yoğunluğu ile mücadele amacıyla trafik düzenlemesi, güzergâh seçimi ve ađ tasarımı gibi şehir lojistiğini çeşitli düzeylerde optimize etmeye yönelik planlama araçları geliştirilmeye devam etmektedir. Çabaların odaklandığı alanlardan biri de tedarikçilerden müşterilere ürün taşımacılığının etkinliğini artırmaktır. Bu amaçla yapılan planlama faaliyetleri çeşitli seviyelerde (operasyonel, taktiksel ve stratejik) ve farklı planlama ufuklarında kararların verilmesini gerektirmektedir (Breunig vd., 2016).

Araç Rotalama Problemi (ARP) lojistik alanında en yaygın kullanılan ve operasyonel düzeyde kararlara yönelik geliştirilmiş bir problem ailesini ifade etmektedir. Tek-kademeli dağıtım sistemleri kapsamında yer alan ARP, belirli kısıtlar altında bir veya birden fazla dağıtım noktasından (depo) coğrafi olarak dağılmış belirli müşterilerin taleplerini karşılayacak minimum maliyetli araç rotalarının belirlenmesi ile ilgilendir (Christofides vd., 1981; Laporte, 1992). Problem, NP-zor problem sınıfına giren kombinasyonel bir problem türüdür (Bent ve Van Hentenryck, 2004). Literatürde en yaygın ele alınan araç rotalama problemlerinden biri olan Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (KKARP), her bir aracın rotasına öncelikle depodan başlamasına ve tüm müşterilerin ziyareti gerçekleştikten sonra tekrar yine aynı depoya dönmesine dayanmaktadır. Bu problem türünde, filodaki her bir araç homojen özelliktedir. Belirli bir yük taşıma kapasiteleri vardır ve tüm araçların kapasiteleri birbirine eşit ve benzer maliyetlere (sigorta, bakım vb.) sahiptir. Ayrıca, araç kapasiteleri ve müşteri talepleri önceden bilindiği varsayılmaktadır (Kumar ve Panneerselvam, 2012).

Son yıllarda, yük taşımacılığından kaynaklanan çevresel kirlilik, trafik sıkışıklığı, trafik kazaları, gürültü, hastalık, düşük ortalama araç yükleri vb. sebepler büyük kamyonların şehir merkezlerine girişini sınırlandıran ve/veya yasaklayan ve ayrıca elektrikli araçlar gibi sıfır emisyonlu araçların kullanımını teşvik eden yeni politikaları ve girişimleri beraberinde getirmiştir (Cattaruzza vd., 2017). Bu durum, klasik ARP'de olduğu gibi ürünlerin depodan müşterilere doğrudan taşınması yerine çok-kademeli dağıtım sistemleri, özellikle iki-kademeli sistemler, üzerine yoğunlaşılmasına neden olmuştur (Perboli vd., 2011; Zeng vd., 2014). İki-kademeli dağıtım sistemleri, büyük araçların yoğun nüfuslu şehir merkezlerinden uzak tutulmasına yardımcı olmak amacı ile yükün önce ara depolara (uydu) büyük araçlar vasıtasıyla getirilmesine, daha sonra ürünlerin bu nokta(lar)dan müşterilere daha küçük kapasiteli araçlarla teslimatının sağlanmasına dayanır (Crainic vd., 2012; Grangier vd., 2016; Liu vd., 2017; Zhou vd., 2018). Literatürde, bu tür sistemlerin ekonomik açıdan da oldukça cazip olduğuna dair çalışmalar bulunmaktadır (Breunig vd., 2019). İki-kademeli dağıtım sistemlerinin şehir lojistiği, çok modlu taşıma, posta ve paket teslimatı, süt toplama, basın ve market ürünlerinin dağıtımı vb. birçok alanda uygulamalarını görmek mümkündür. Bunlardan en sık başvuru alan uygulama ise şehir lojistiğidir (Cuda vd., 2015).

Bu bağlamda, İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (2A-ARP), iki-kademeli dağıtım sistemlerinde ortaya çıkan ve taktiksel düzeyde kararları içeren bir rotalama problem türüdür (Li vd., 2016b). Kapasite Kısıtlı İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (KK2A-ARP), dağıtım ağında yer alan deponun, uydu ve müşteri noktalarının yerlerinin bilindiği ve dağıtım ağının iki seviyeye

bölündüğü bir problem tipi olarak literatürde yerini almıştır. Birinci kademede ürünler ana depolardan uydu (*satellite*) noktalarına büyük araçlar vasıtasıyla getirilmekte; ikinci kademede ise ürünler bu nokta(lar)dan müşterilere daha küçük kapasiteli ve/veya çevreyi nispeten daha az kirleten araçlarla (örn. elektrikli araçlar) teslim edilmektedir (Crainic vd., 2012; Grangier vd., 2016; Liu vd., 2017; Zhou vd., 2018). Doğrudan dağıtım izin verilmemektedir; dolayısıyla, ürünler zorunlu olarak uydu noktaları vasıtasıyla müşterilere ulaştırılmaktadır. Uydu noktaları genellikle aktarma ve konsolidasyon faaliyetlerinin gerçekleştirildiği fiziksel alanlar olarak tanımlanmaktadır. Bir uydu noktası genellikle küçük ölçekte çalışmakta, dış otopark ve hava şartlarından korunma alanlarından oluşmakta ve sınırlı ve geçici depolama kapasitesine sahiptir (Li vd., 2018). Dağıtım ağında yer alan tüm uydu noktaları kullanılmak zorunda değildir (Jie vd., 2019). ARP, tek bir uydulu 2A-ARP'nin özel bir durumu olduğundan 2A-ARP de NP-zor problem sınıfına girmektedir (Breunig vd., 2015; Hemmelmayr vd., 2012; Perboli vd., 2011; Santos vd., 2013; Wang vd., 2017).

Bu çalışma, literatürde güncel olarak uygulamaları her geçen gün yaygınlaşan iki-kademeli dağıtım sistemleri kapsamında İki-Aşamalı Araç Rotalama Probleminin temel yaklaşımlarına kapsamlı bir bakış sunmayı ve gerçek hayat verisinden ilham alarak tasarlanan bir uygulama ile konvansiyonel tek-kademeli dağıtım sistemlerine göre çeşitli göstergeler açısından karşılaştırmalı bir analizini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, Araç Rotalama ve İki Aşamalı Araç Rotalama problemlerinin en temel hali olan kapasite kısıtlı modeller baz alınmakta, iki-kademeli dağıtım sistemlerinin hangi koşullarda avantajlı olduğunu anlamak adına çözülebilir ölçekte problemlerle uydu kapasitesi, araç sayısı, araç kapasitesi ve talep gibi faktörler açısından farklı varsayımları ele alan senaryolarla değerlendirme yapılması hedeflenmektedir. Belirtilen amaçlara yönelik olarak, öncelikle, literatürde yer alan 66 adet 2A-ARP uygulaması çözüm yaklaşımları açısından sınıflanarak metodolojik detayları tasnif edilmekte ve gözlemler tartışılmaktadır. Daha sonra, bir uygulama tasarımı çerçevesinde, kapasite kısıtlı ARP ve 2A-ARP modelleri, mesafe, yakıt tüketimi, süre ve maliyet olmak üzere dört ayrı amaç fonksiyonu kullanılarak kıyaslamaya tabi tutulmaktadır. Uygulamanın, problem alanı olarak Türkiye'de faaliyet gösteren bir süpermarket zincirinin dağıtım ağı örnek alınmıştır. Tasarlanan problemler üzerinde parametrelerdeki değişimin (uydu kapasiteleri, talep miktarları, filodaki araç sayıları ve araç kapasiteleri) etkisini analiz etmek amacıyla 25 farklı senaryo ile duyarlılık analizleri yapılarak sonuçları sunulmaktadır. Bunun yanı sıra, araçların kiralama ve yatırım maliyetleri de göz önünde bulunduran kıyaslamalar da yapılarak sonuçları tartışılmaktadır. Çalışma ile lojistik yönetiminin en güncel modelleme yaklaşımlarından biri olan iki-kademeli dağıtım sistemlerine deneysel bir bakış açısı sunulmaktadır. ARP her ne kadar kendi literatürlerinde oldukça fazla çalışma ile incelenmiş olsa da 2A-ARP literatürü ve iki problemin kıyaslamaya tabi tutularak avantaj/dezavantaj durumlarının ortaya konulduğu çalışmalar literatürde oldukça sınırlı sayıdadır. Çalışmanın bu deneysel niteliği ve sunduğu senaryo çeşitliliğinin gelecekteki 2A-ARP uygulamaları için yol gösterici olması beklenmektedir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde organize edilmektedir. İkinci bölümde 2A-ARP literatürüne yönelik genel bir bakış sunulmaktadır. Literatürde yer alan uygulamaların tasnifi çalışmanın ekte sunulurken temel bulgular bu bölümde tartışılmaktadır. Çalışmanın üçüncü bölümünde, ARP ve 2A-ARP için problem tanımları ve matematiksel modeller sunulmaktadır. Dördüncü bölüm, yapılan uygulamaya yönelik veri setinin nasıl oluşturulduğuna ve kıyaslamaya tabi tutulan amaç fonksiyonlarının hesaplamalarının ayrıntısına ayrılmıştır. Uygulamanın

bulguları beşinci bölümde sunulmakta ve tartışılmaktadır. Son bölümde, çalışmanın sonuçları özetlenmektedir.

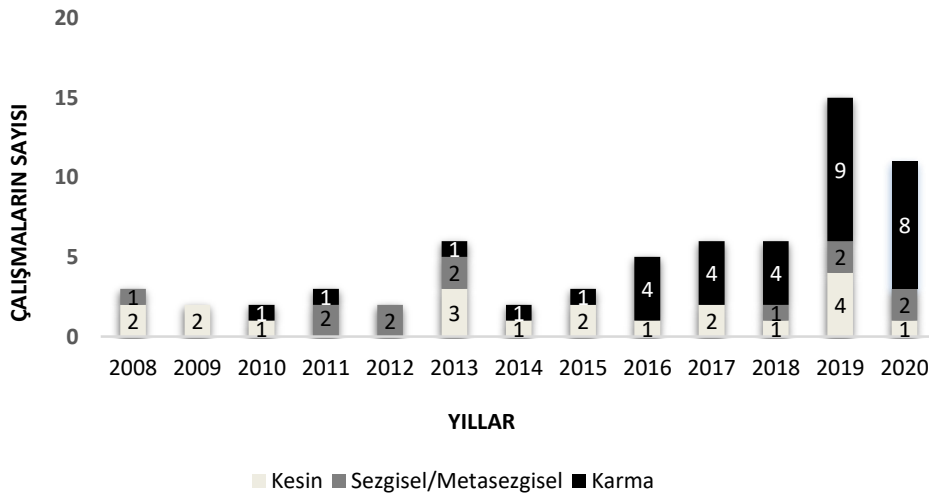
## 1. İKİ-AŞAMALI ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ LİTERATÜRÜ

Araç Rotalama Problemi (ARP), optimizasyon literatüründe önemli bir yer tutmaktadır (Li vd., 2020a). ARP ilk kez Dantzig ve Ramser tarafından 1959 yılında “Kamyon Sevkiyat Problemi (*Truck Dispatching Problem*)” olarak benzin istasyonlarına benzin dağıtımını yapmak amacıyla çalışılmıştır (Baldacci vd., 2008; Fukasawa vd., 2006). Daha sonra, Clarke ve Wright, 1964 yılında tasarruf algoritmasını geliştirmiş ve bu problemi bir doğrusal optimizasyon problemine dönüştürmüştür (Braekers vd., 2016). Klasik ARP olarak bilinen bu problem Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (KKARP) olarak da anılmaktadır. Akademik literatürdeki ARP çalışmaları oldukça çok sayıda olmakla birlikte her yıl giderek daha da artmaktadır (Vidal vd., 2020). Bunlara Angelelli ve Speranza (2002), Tarantilis vd. (2005), Ombuki vd. (2006), Jin vd. (2008), Penna vd. (2013), Montoya vd. (2016), Soriano vd. (2020) ve Behnke vd. (2021)’in çalışmaları örnek olarak verilebilmektedir.

İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (2A-ARP) taşımanın uydu noktaları olarak bilinen ara depolara, oradan da müşteri noktalarına iki keademedede taşınmasını ele alan bir ARP modellemesi yaklaşımıdır. Problemin ilk resmi tanımı Gonzalez-Feliu (2008) tarafından yapılmıştır (Dellaert vd., 2016; Eitzen vd., 2017). Gonzalez-Feliu (2008), kapasite kısıtlı ve akış-temelli bir matematiksel model ortaya koymuş ve bu modelin sürekli gevşetmesini güçlendirmek için ARP formülasyonundan türetilmiş birtakım geçerli eşitsizlikler önermiştir. Literatüre sunumundan beri Kapasite Kısıtlı İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (KK2A-ARP) modelleri ve türevleri birçok çalışmaya konu olmuştur. Aşağıda, 2A-ARP literatürüne genel bir bakış sunulmaktadır.

2A-ARP üzerine yapılan çalışmalar, kullanmış oldukları çözüm metotlarına göre *kesin, sezgisel ve/veya metasezgisel* ve hem kesin hem de sezgisel/metasezgisel yöntemlerin bir arada kullanıldığı *karma* yöntemler olmak üzere 3 ayrı grupta değerlendirilebilmektedir. Ekte sunulan Tablo E1, bu alanda yapılan 66 çalışmayı sınıflamakta ve çözüm yöntemlerini özetlemektedir. Çözüm metotlarının yıllara göre dağılımı Şekil 1’de sunulmaktadır.

Şekil 1: 2A-ARP Çalışmalarında Kullanılan Çözüm Metotlarının Yıllara Göre Dağılımı



Şekil 1'den de görüleceği üzere 2A-ARP üzerine yapılan çalışmaların sayısı, özellikle son yıllarda oldukça artmıştır. Öte yandan, problemlere makul sürelerde optimum çözümler bulmanın zorlaşması ve bazen de imkânsız hale gelmesi nedeniyle kullanılan/geliştirilen çözüm algoritmalarının çeşitlendiği ve hatta entegre avantajlarından yararlanabilmek amacıyla karma yöntemlerin kullanımının yaygınlaştığı gözlemlenmektedir.

Çalışmalarda olabildiğince gerçek hayatın yansıtılabilmesi amacıyla problemlerin daha kapsamlı bir şekilde ele alınmaya çalışılması, problemin en temel hali olan KK2A-ARP varsayımlarının genişletilmesine ve literatürde yeni 2A-ARP çeşitlerinin doğmasına yol açmıştır. Dağıtım ağında birden fazla merkezi deponun olması, ürünlerin hem dağıtımının hem de toplanmasının söz konusu olması, taleplerin dinamik olması, uydu noktalarının mobil olması, ürünlerin taşınmasında elektrikli ve hatta insansız hava araçlarının kullanılması, müşterilere teslimat seçeneklerinin sunulması gibi günümüz dağıtım sistemlerini yansıtan çok çeşitli varsayımların düşünüldüğü görülmektedir. Çalışmalarda yer alan en yaygın varsayımların; araçlar için akü kapasitelerinin söz konusu olması, şoförlerin belirli süreleri aşan çalışmalarının engellenebilmesi vb. nedenlerden dolayı araçların sınırlı sürüş menziline sahip olması (araçların rota sürelerinin veya uzunluklarının sınırlandırılması) ve uydu ve/veya müşteri noktalarındaki hizmet sürelerinin hesaba katılması olduğu gözlemlenmektedir. Bu varsayımlardan sonra en sık kullanılan bir diğer varsayım ise uydu noktalarına ve/veya müşterilere ürün teslimatlarının herhangi bir zamanda değil belirli bir zaman aralığında yapılabilmesidir.

Çalışmalarda ele alınan amaç fonksiyonlarının/amaç fonksiyonu bileşenlerinin neler olduğu ve nasıl formülize edildiği incelendiğinde, problemlerin tümünün minimizasyon problemi olarak ele alındığı ve karbon emisyon değerlerinin, toplam seyahat süresinin, kullanılan araç sayısının, toplam müşteri bekleme süresinin (müşteri memnuniyetinin maksimize edilmesi) minimize edilmesi gibi oldukça çeşitli amaçların yer aldığı genel olarak ise maliyetin minimize edilmeye çalışıldığı görülmektedir. Toplam maliyet fonksiyonu bileşenlerinde yaygın olarak araçların kat ettiği mesafe cinsinden hesaplanan seyahat maliyeti ve uydu noktalarında ürünlerin bir araçtan boşaltılıp diğerine yüklenmesinden kaynaklanan elleçleme maliyeti (*handling cost*) dikkate alınmaktadır.

Problemlere daha hızlı ve daha etkin çözümler üretmek amacıyla yeni modellerin ve/veya çözüm algoritmalarının geliştirilmesi kadar bu algoritmaların doğru çalıştığının kanıtlanabilmesi ve dolayısıyla çalışılan probleme yönelik uygulamanın yapılabilmesi için uygun verinin elde edilmesi de çalışmalar açısından hayati öneme sahiptir. Çalışmalarda kullanılan veri setlerinin ediniminde; örneklemi yazarların kendilerinin tütettiği (rastgele, belirli bir senaryo ile vb.), literatürde var olan örneklemelerin kullanıldığı (ya da bu örneklemelerden türetildiği) veya gerçek hayattaki verilerin kullanıldığı gözlemlenmektedir.

## 2. METODOLOJİ

Bu bölümde çalışmanın temel problemleri olan Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (KKARP) ve Kapasite Kısıtlı İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (KK2A-ARP) kapsamındaki temel tanımlar ve problemlerin matematiksel modelleri sunulmaktadır.

### 2.1. KKARP Problem Tanımı ve Matematiksel Modeli

Problem  $G(V, A)$  tam bir şebeke üzerinde şu şekilde tanımlanabilmektedir: Ürün taleplerinin dağıtımı,  $O$  ile gösterilen, tek bir depodan  $n$  adet müşteriye ( $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ) yapılmaktadır. Burada  $V = \{O\} \cup N$  düğüm kümesini,  $A = \{(i, j): i, j \in V, i \neq j\}$  ise depo ile müşterileri

ve müşteri çiftlerini birbirine bağlayan yay kümesini ifade etmektedir.  $i'$  den  $j'$  ye giden bir araç için seyahat maliyeti söz konusu olmakta ve  $c_{ij}$  ile gösterilmektedir. Döğümler arasındaki mesafeler simetrik değildir ( $c_{ij} \neq c_{ji}$ ). Hepsı aynı kapasiteye ( $Q > 0$ ) ve benzer maliyetlere sahip  $K$  adet homojen araç depoda yer almaktadır. Ürün depodan müşterilere bu araçlarla taşınmaktadır.  $d_i \geq 0, i \in N$  olmak üzere,  $i$  müşterisine teslim edilmesi gereken talep miktarını göstermektedir. Problemin amacı, toplamda kat edilen mesafeyi minimize edecek, yukarıda söz edilen kısıtları sağlayan optimal araç rotalarının belirlenmesidir. Aşağıda verilen matematiksel model (Toth ve Vigo, 2014) için gerekli tüm notasyon Tablo 1 ile sunulmaktadır.

**Tablo 1: KKARP Modeline Ait Küme, Parametre ve Karar Değişkenleri**

Grup	Sembol	Tanım
Kümeleler	$N = \{1, 2, \dots, n\}$	Müşteri kümesi
	$V = \{0\} \cup N$	Döğüm kümesi
	$A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$	Yay kümesi
Parametreleler	$c_{ij}$	$i$ ve $j$ döğümü arasındaki mesafe ( $\forall i, j \in V, i \neq j$ )
	$K$	Filoda yer alan araç sayısı
	$Q$	Araç kapasitesi
	$d_i$	$i$ müşterisinin talebi ( $\forall i \in N$ )
Karar Değişkenleleri	$x_{ij}$	Aracın $i$ döğümünden $j$ döğümüne gitmesi durumunda 1 diğer durumlarda ise 0 değerini alan ikili karar değerışkeni ( $\forall i, j \in V, i \neq j$ )
	$I_{ij}$	Aracın $i$ döğümünden ayrılırkenki yükü ( $\forall i, j \in V, i \neq j$ )

$$\text{Minimize } \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij} \quad (1.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i \in V \setminus \{j\}} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (1.2)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (1.3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0j} \leq K \quad (1.4)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} I_{ij} = \sum_{j \in V \setminus \{i\}} I_{ji} - d_i \quad \forall i \in N \quad (1.5)$$

$$I_{ij} \leq Q x_{ij} \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (1.6)$$

$$\sum_{i \in N} I_{i0} \leq 0 \quad (1.7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V \quad (1.8)$$

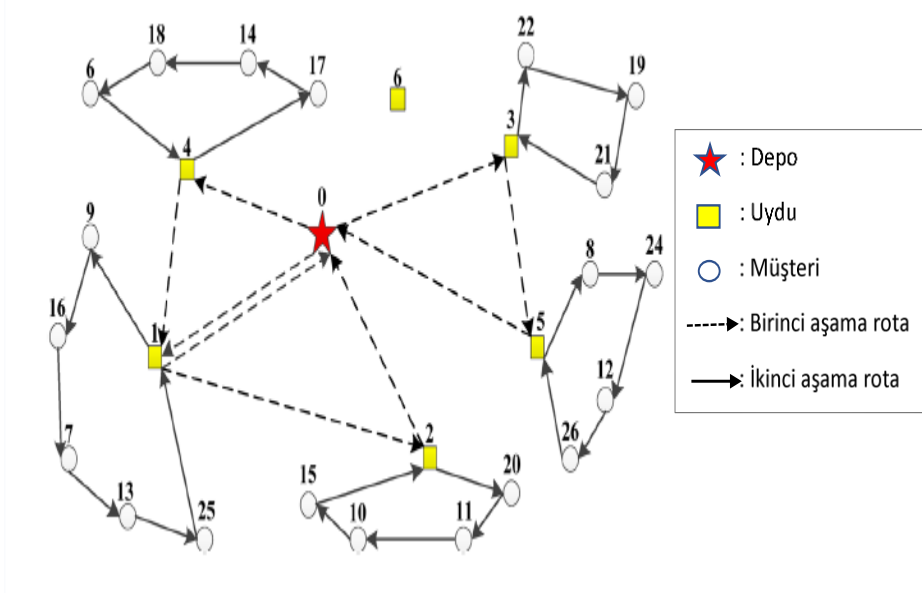
$$I_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in V \quad (1.9)$$

Modelde (1.1) ile verilen amaç fonksiyonu, araçların kat ettiği toplam mesafeyi minimize etmektedir. (1.2) ve (1.3) ile verilen kısıtlar, sırasıyla, her bir müşteri noktasına yalnızca bir kez gelinmesi ve her bir müşteri noktasından yalnızca bir kez çıkılması gerektiğini ifade etmektedir. Diğer bir deyişle, bir rotada her bir müşteri düğümü birini öncül diğeri ardıl olmak üzere iki diğeri düğüme bağlanmalıdır. Rota sayısının filoda bulunan araç sayısından fazla olamayacağı kısıt (1.4) ile verilmektedir. Kısıtlar (1.5)-(1.7), her bir yay üzerindeki yükün akışını düzenleyen ve araç kapasitelerinin aşılmamasını sağlayan kısıtlardır. Aracın yükünün takip edilmesi durumunda ((1.5) kısıtları), alt turları elimine etmeye yarayan kısıtların kullanımına gerek kalmamaktadır (Bard ve Nananukul, 2009; Treitl vd., 2012). (1.8) ve (1.9) ile verilen kısıtlar ise karar değişkenlerinin tanımına ilişkin kısıtlardır.

## 2.2. KK2A-ARP Problem Tanımı ve Matematiksel Modeli

İki-kademeli dağıtım sisteminin gösterimi aşağıda Şekil 2 ile sunulmaktadır. Şekildeki yıldız merkezi depoyu, dikdörtgenler uydu noktalarını ve daireler müşterileri göstermektedir. Dağıtım ağında iki tür rota bulunmaktadır. Birinci aşamada araç(lar) rotasına merkezi depodan başlamakta ve bir ya da birden fazla uydu noktasına uğradıktan sonra yine merkezi depoya geri dönmektedirler (kesikli çizgiler). İkinci aşamada ise araçlar rotasına bir uydu noktasından başlamakta ve bir ya da birden fazla müşteriye ziyaret ettikten sonra aynı uydu noktasına geri dönmektedirler (düz çizgiler). Birinci aşamada ayrı teslimata izin verilirken (1 numaralı uydu noktası); ikinci aşamada izin verilmemektedir. Ayrıca, dağıtım ağında yer alan her bir uydu noktası kullanılmak zorunda değildir (6 numaralı uydu noktası).

Şekil 2: İki-Aşamalı Dağıtım Sisteminin Gösterimi



Kaynak: Wang vd., 2017

Problem  $G = (V, A \cup A')$  tam bir şebeke üzerinde şu şekilde tanımlanabilmektedir (Jepsen vd., 2013; Soysal vd., 2015):  $0$  ile gösterilen bir adet depo ( $V_0 = \{0\}$ ), bir uydu kümesi ( $V_s$ ) ve bir müşteri kümesi ( $V_c$ ) olmak üzere  $V = V_0 \cup V_s \cup V_c$  düğümler kümesini ifade etmektedir. Yaylar kümesi iki alt kümeden oluşmaktadır.  $A = A(V_0 \cup V_s)$  birinci aşamadaki yaylar kümesini,  $A' = A(V_s \cup V_c)$  ikinci aşamadaki yaylar kümesini göstermektedir.  $K = \{1, 2, \dots, k\}$  birinci aşamadaki

araçlar kümesini göstermekte ve araçların tümü aynı taşıma kapasitesine ( $Q > 0$ ) sahiptir. Benzer şekilde,  $Q' < Q$  olmak üzere, tümü aynı kapasiteye sahip ( $Q' > 0$ ) olan  $k'$  adet araç ikinci aşamada yer almaktadır ( $k' = \sum_{s \in V_s} k'_s$ ). Burada,  $s \in V_s$  olmak üzere,  $k'_s$  ise  $s$  uydusu noktasında kullanılabilir maksimum ikincil kademe araç sayısını ifade etmektedir.  $i$  müşterisine ait talep miktarı,  $d_i \geq 0$  ve  $i \in V_c$  olmak üzere,  $d_i$  ile verilmektedir. Döğümler arasındaki mesafe, birinci aşamada  $c_{ij}$  ( $(i, j) \in A, i \neq j$ ) ile ikinci aşamada ise  $c'_{ij}$  ( $(i, j) \in A', i \neq j$ ) ile ifade edilmektedir. Döğümler arasındaki mesafeler simetrik değildir ( $c_{ij} \neq c_{ji}$  ve  $c'_{ij} \neq c'_{ji}$ ).  $s \in V_s$  olmak üzere,  $h_s$ ,  $s$  uydusunda ürünün birim taşıma maliyetini belirtmektedir. Kısa gösterim için kullanılan  $\delta^-(s)$  ve  $\delta^+(s)$ ,  $s \in V_s$  olmak üzere, sırasıyla birinci aşamada  $s$  uydusuna gelen yayları ve birinci aşamada  $s$  uydusundan çıkan yayları ifade etmektedir. İkinci aşamada ise,  $i \in V_s \cup V_c$  olmak üzere,  $i$  döğümüne gelen yaylar  $\delta^-(i)$  ile  $i$  döğümünden çıkan yaylar  $\delta^+(i)$  ile ifade edilmektedir. Problemin amacı, yukarıda bahsedilen varsayımları sağlayan, toplamda kat edilen seyahat mesafesini minimize edecek bir dizi birincil ve ikincil optimal araç rotalarının belirlenmesidir. Aşağıda verilen Karma Tamsayı Programlama (KTP) modeli (Jepsen vd., 2013; Soysal vd., 2015) için gerekli tüm notasyon Tablo 2 ile sunulmaktadır.

**Tablo 2: KK2A-ARP Modeline Ait Küme, Parametre ve Karar Değişkenleri**

Grup	Sembol	Tanım
Kümeler	$V_0 = \{0\}$	Depo
	$V_s = \{1, 2, \dots, s\}$	Uydu kümesi
	$V_c = \{1, 2, \dots, c\}$	Müşteri kümesi
	$V = V_0 \cup V_s \cup V_c$	Döğüm kümesi
	$A = A(V_0 \cup V_s)$	Birinci aşama yay kümesi
	$A' = A(V_s \cup V_c)$	İkinci aşama yay kümesi
	$\delta^-(s)$	Birinci aşamada $s \in V_s$ uydusuna gelen yaylar
	$\delta^+(s)$	Birinci aşamada $s \in V_s$ uydusundan çıkan yaylar
	$\delta^-(i)$	İkinci aşamada $i \in V_s \cup V_c$ döğümüne gelen yaylar
	$\delta^+(i)$	İkinci aşamada $i \in V_s \cup V_c$ döğümünden çıkan yaylar
Parametreler	$K = \{1, 2, \dots, k\}$	Birinci aşamada yer alan araç kümesi
	$k'$	İkinci aşamada yer alan toplam araç sayısı
	$k'_s$	$s$ uydusu noktasında kullanılabilir maksimum ikincil kademe araç sayısı ( $\forall s \in V_s$ )
	$Q$	Birinci aşama araçların taşıma kapasitesi
	$Q'$	İkinci aşama araçların taşıma kapasitesi
	$d_i$	$i$ müşterisinin talebi ( $\forall i \in V_c$ )
	$c_{ij}$	Birinci aşamada $i$ ve $j$ döğümleri arasındaki mesafe ( $\forall (i, j) \in A, i \neq j$ )
	$c'_{ij}$	İkinci aşamada $i$ ve $j$ döğümleri arasındaki mesafe ( $\forall (i, j) \in A', i \neq j$ )



Karar Değişkenleri	$x_{ijk}$	Birinci aşamadaki $k$ aracının $i$ düğümünden $j$ düğümüne gitmesi durumunda 1 diğer tüm durumlarda ise 0 değerini alan ikili karar değişkeni ( $\forall k \in K, (i, j) \in A, i \neq j$ )
	$w_{sk}$	$k$ aracıyla $s$ uydusuna teslim edilen ürün miktarı ( $\forall k \in K, s \in V_s$ )
	$I_{ijk}$	$i$ düğümünden ayrılırken $k$ aracının yükü ( $\forall (i, j) \in A, k \in K$ )
	$z_{ijs}$	İkinci aşamada $s$ uydusundan çıkmış aracın $i$ düğümünden $j$ düğümüne gitmesi durumunda 1 diğer tüm durumlarda ise 0 değerini alan ikili karar değişkeni ( $\forall s \in V_s, (i, j) \in A', i \neq j$ )
	$f_{ijs}$	$i$ düğümünden ayrılırken $s$ uydusundan çıkmış aracın yükü ( $\forall (i, j) \in A', s \in V_s$ )
	$t_s$	$s$ uydusundan teslim edilen toplam talep miktarı ( $\forall s \in V_s$ )

$$\text{Minimize } \sum_{k \in K} \sum_{(i, j) \in A} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{s \in V_s} \sum_{(i, j) \in A'} c'_{ij} z_{ijs} \quad (2.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{(i, j) \in \delta^+(s)} x_{ijk} = \sum_{(i, j) \in \delta^-(s)} x_{ijk} \quad \forall s \in V_s, k \in K \quad (2.2)$$

$$\sum_{(i, j) \in \delta^+(s)} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall s \in V_0 \cup V_s, k \in K \quad (2.3)$$

$$\sum_{(i, j) \in \delta^+(s)} I_{ijk} = \sum_{(i, j) \in \delta^-(s)} I_{ijk} - w_{ik} \quad \forall s \in V_s, k \in K \quad (2.4)$$

$$I_{ijk} \leq Q x_{ijk} \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (2.5)$$

$$\sum_{(i, j) \in \delta^-(s)} I_{ijk} \leq 0 \quad \forall s \in V_0, k \in K \quad (2.6)$$

$$\sum_{k \in K} w_{sk} = t_s \quad \forall s \in V_s \quad (2.7)$$

$$\sum_{s \in V_s} \sum_{(a, b) \in \delta^+(i)} z_{abs} = 1 \quad \forall i \in V_c \quad (2.8)$$

$$\sum_{(a, b) \in \delta^-(i)} z_{abs} = \sum_{(a, b) \in \delta^+(i)} z_{abs} \quad \forall i \in V_c, s \in V_s \quad (2.9)$$

$$\sum_{s' \in V_s \setminus \{s\}} \sum_{(a, b) \in \delta^+(s)} z_{abs'} + \sum_{s' \in V_s \setminus \{s\}} \sum_{(a, b) \in \delta^-(s)} z_{abs'} = 0 \quad \forall s \in V_s \quad (2.10)$$

$$\sum_{(a, b) \in \delta^+(s)} z_{abs} \leq \quad \forall s \in V_s \quad (2.11)$$

$$\sum_{s \in V_s} \sum_{(a, b) \in \delta^+(s)} z_{abs} \leq k' \quad (2.12)$$

$$\sum_{s \in V_s} \sum_{(a, b) \in \delta^+(i)} f_{abs} = \sum_{s \in V_s} \sum_{(a, b) \in \delta^-(i)} f_{abs} - d_i \quad \forall i \in V_c \quad (2.13)$$

$$f_{a b s} \leq Q' z_{a b s} \quad \forall (a, b) \in A', s \in V_s \quad (2.14)$$

$$t_s = \sum_{(a, b) \in \delta^+(i)} f_{a b s} \quad \forall s \in V_s \quad (2.15)$$

$$\sum_{s \in V_s} t_s = \sum_{i \in V_c} d_i \quad \forall s \in V_s \quad (2.16)$$

$$x_{i j k} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (2.17)$$

$$z_{i j s} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A', s \in V_s \quad (2.18)$$

$$w_{s k} \geq 0 \quad \forall s \in V_s, k \in K \quad (2.19)$$

$$l_{i j k} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (2.20)$$

$$f_{i j s} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A', s \in V_s \quad (2.21)$$

$$t_s \geq 0 \quad \forall s \in V_s \quad (2.22)$$

(2.1) ile verilen amaç fonksiyonu birinci aşamadaki ve ikinci aşamadaki araçların kat ettiği toplam mesafeyi minimize etmek üzere iki parçadan oluşmaktadır. (2.2) ve (2.6) arasındaki kısıtlar dağıtım ağının birinci aşaması ile ilgili kısıtlardır. (2.2) ile verilen kısıtlar, her bir uyduda tüm araçlar için akışın korunumunu sağlayan kısıtlardır. Bir aracın bir uyduyu en fazla bir kez ziyaret etmesini sağlayan kısıtlar (2.3) ile verilmektedir. Bir uydu noktası birden fazla birincil kademe araç tarafından ziyaret edilebilmekte ancak tek bir araç bir uyduyu birden fazla kez ziyaret edememektedir. (2.4) ve (2.6) arasında yer alan kısıtlar, her bir yay üzerindeki yükün akışını düzenleyen ve araç kapasitelerinin aşılmamasını sağlayan kısıtlardır. Ayrıca, (2.4) kısıtları birinci aşamada alt turları elimine etmektedir (Bard ve Nananukul, 2009; Treitl vd., 2012). Yükün birinci aşamadaki akışı ile ikinci aşamadaki akışının koordine edilmesi (2.7) kısıtları ile sağlanmaktadır. Söz konusu kısıtlar, her bir uydu noktasına birincil kademe araçlar ile getirilen toplam ürün miktarıyla bu uydu noktalarından müşterilere teslim edilen toplam talep miktarını ilişkilendirmektedir. (2.8) ve (2.16) arasındaki kısıtlar ise dağıtım ağının ikinci aşamasıyla ilgili kısıtlardır. Her bir müşterinin yalnızca ve muhakkak bir kez ziyaret edilmesi, (2.8) ile verilen kısıtlar vasıtasıyla sağlanmaktadır. (2.9) kısıtları, her bir müşteride aracın başlangıç noktasının korunmasını sağlayan kısıtlardır. Uydular arasındaki trafiği elimine eden kısıtlar (2.10) ile verilmektedir. Diğer bir deyişle, ikinci aşamada bir uydu noktasından diğerine gidişi ortadan kaldırmaktadırlar. (2.11) ve (2.12) ile verilen kısıtlar, kullanılan araç sayısının mevcut araç sayısından fazla olmamasını garanti etmektedirler. İkinci aşamadaki her bir yay üzerindeki akışın korunumu ve araç kapasitelerinin aşılmamasının sağlanması (2.13) ve (2.14) kısıtları ile temin edilmektedir. Ayrıca (2.13) kısıtları ikinci aşamada alt turları elimine etmektedir. (2.15) kısıtları, her bir uydu noktası için, ürün akışının korunumunu sağlamaktadırlar. Tüm uydu noktalarından gönderilen toplam ürün miktarının, tüm müşterilere ait toplam talebe eşit olmasını sağlayan kısıtlar (2.16) ile verilmektedir. (2.17)-(2.22) ile verilen kısıtlar ise modeldeki karar değişkenlerinin tanımına ilişkin kısıtlardır.

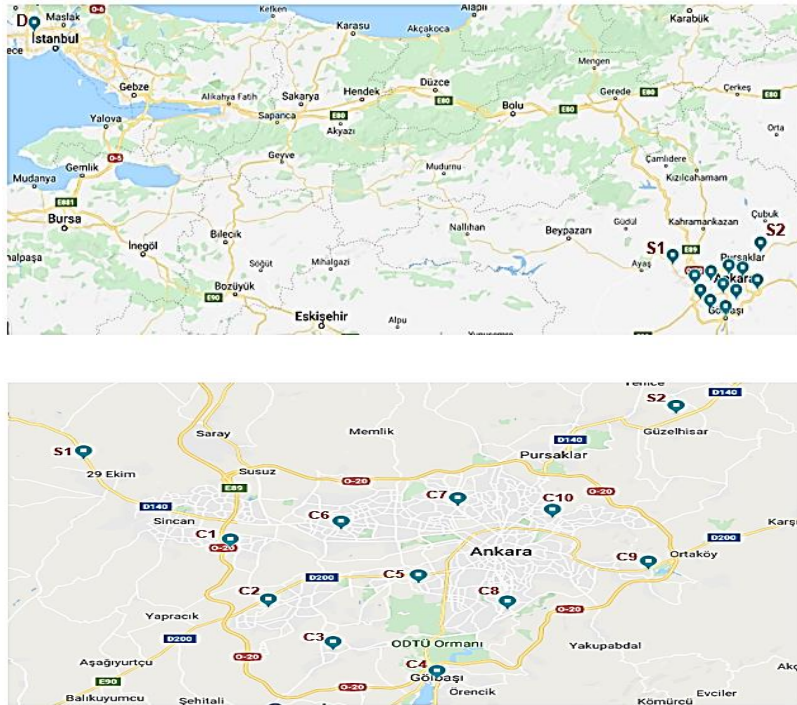
### 3. UYGULAMA TASARIMI

Bu uygulamada, iki-kademeli dağıtım sistemlerinin hangi koşullarda avantajlı olduğunu anlamak amacı ile Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (KKARP) ve Kapasite Kısıtlı İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (KK2A-ARP) modelleri farklı amaç fonksiyonları (mesafe, yakıt tüketimi, süre ve maliyet) ve değişen parametreler (uydu kapasiteleri, talep miktarları, filodaki araç sayıları ve araç kapasiteleri) altında kapsamlı bir biçimde karşılaştırılmaktadır. Ayrıca, araçların kiralama ve yatırım maliyetleri de göz önünde bulunduran ek kıyaslamalar yapılarak sonuçları tartışılmaktadır. Aşağıda, karşılaştırmaya esas olmak üzere kullanılan veri setinin, parametrelerin ve amaç fonksiyonlarının detayları verilmektedir. Ele alınan her iki problem de kapasite kısıtlı olduğu için metnin devamında problemler ARP ve 2A-ARP modelleri olarak adlandırılmaktadır.

#### 3.1. Veri Seti

Uygulamada, Türkiye’de faaliyet gösteren bir süpermarket zincirinin dağıtım ağı örnek alınmıştır. 2A-ARP için dağıtım ağı bir merkezi depo, 2 uydu ve 10 müşteriden (süpermarket şubeleri) oluşmaktadır. ARP için ise uydu noktaları bulunmamaktadır (1 depo, 10 müşteri). Söz konusu süpermarket zincirinin merkezi deposu İstanbul’da yer almaktadır. Uydular, Ankara ili sınırlarında yer alan ve şehir içine dağıtımın yapıldığı ara depolardır. Süpermarket şubelerinin örnekleme seçilmesinde, Ankara ilinin merkezi ilçelerinin bulunduğu haritanın on eşit parçaya bölünmesi ve her bir bölgede (merkezde) bir şube olacak şekilde seçilmesi yöntemi izlenmiştir. Dağıtım ağı Şekil 3 ile gösterilmektedir. D noktası ana depoyu, S1 ve S2 noktaları uydu noktalarını, C1, C2, ..., C10 ise müşteri noktalarını ifade etmektedir.

Şekil 3: Süpermarket Zinciri İçin Dağıtım Ağının Gösterimi



Düğümmler arasındaki mesafe verisi *Google Haritalar* kullanılarak elde edilmiştir. Bu veri, ARP için Ek'te Tablo E2, 2A-ARP için Tablo E3'te verilmektedir.<sup>1</sup> Talep değerleri, ikinci aşamada ayırık teslimata izin verilmemesinden dolayı tek bir müşteriye ait talebin ikincil kademe araç kapasitesini geçmeyeceği şekilde, rastgele oluşturulmuştur. C1'den C10'a, sırasıyla, müşteri talepleri (kg) 2.400, 1.800, 1.500, 900, 600, 1.200, 1.300, 800, 2.500, 2.000 olmak üzere toplam talep 15.000'dir. 2A-ARP'de iki tür araç kullanılmaktadır. Depo ve uydu noktaları arasındaki dağıtımda büyük araçlar kullanılırken; uydu noktaları ile müşteriler arasındaki dağıtım küçük araçlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Türkiye'deki büyükşehirlerde Ulaşım Koordinasyon Merkezi (UKOME) tarafından 7 ton ve üzeri ağır tonajlı araçların şehir içine giriş saatlerinin sınırlandırılması ve hatta bazı güzergâhları kullanmalarına izin verilmemesi nedeniyle<sup>2</sup> küçük araç olarak 9 adet azami yüklü ağırlığı 5.500 kg, boş ağırlığı 2.990 kg ve yüklenebilir ağırlığı (taşıma kapasitesi) 2.510 kg olan kamyon örneklem seçilmiştir. Bu araçların 5'i birinci uyduda, 4'ü ikinci uyduda kullanılabilir. Büyük araç olarak ise 2 adet azami yüklü ağırlığı 19.000 kg, boş ağırlığı 7.620 kg ve yüklenebilir ağırlığı 11.380 kg olan kamyon kullanılmaktadır.

### 3.2. Amaç Fonksiyonları

Uygulamada senaryo çeşitliliği ve modeller arasındaki farklılıkların birden fazla boyutta ortaya konulabilmesi adına dört farklı amaç fonksiyonu (mesafe, yakıt tüketimi, süre ve maliyet) ele alınmıştır. Bu bölümde hem ARP hem de 2A-ARP modelleri için kıyaslamada kullanılan amaç fonksiyonları ayrıntısıyla açıklanmaktadır.

#### 3.2.1. Toplam Mesafe

ARP ve 2A-ARP modelleri için araçların kat ettiği toplam mesafeyi minimize etmek üzere, sırasıyla, (1.1) ve (2.1) ile verilen amaç fonksiyonları kullanılmıştır.

#### 3.2.2. Toplam Yakıt Tüketimi

Yakıt tüketiminin hesaplanmasında, Soysal vd. (2015)'teki yaklaşım ile benzer şekilde, aracın kat ettiği mesafeyi (metre), aracın hızını (metre/saniye) ve aracın yükünü (kg) de dikkate alan Demir vd. (2012)'deki kapsamlı emisyon modeli baz alınmıştır.  $\lambda = \xi / \kappa \psi$ ,  $\gamma = 1 / 1000 \epsilon \omega$ ,  $\beta = 0.5 C_d A \rho$ ,  $\alpha = g \sin \phi + g C_r \cos \phi$  olmak üzere söz konusu model aşağıda gösterilmektedir. Fonksiyondaki notasyona ilişkin açıklamalar Tablo 3 ile verilmektedir.

$$\text{Yakıt (litre)} = \lambda (k N_e V \frac{\text{mesafe}}{f} + \gamma \beta f^2 \text{mesafe} + \gamma \alpha (\mu + \text{aracın yükü}) \text{mesafe}) \quad (3)$$

**Tablo 3: Yakıt Tüketimi Fonksiyonu Notasyonu**

Notasyon	Açıklama
$\xi$	Yakıt-hava kütle oranı
$\kappa$	Tipik bir dizel yakıtın ısıtma değeri (kilojul/gram)
$\psi$	Dönüşüm faktörü (gramdan litreye)
$k$	Motor sürtünme faktörü (kilojul/devir/litre)
$N_e$	Motor hızı (devir/saniye)
$V$	Motor hacmi (litre)
$f$	Aracın hızı (metre/saniye)
$\varepsilon$	Aracın güç aktarma organları verimliliği
$\varpi$	Dizel motorlar için verimlilik parametresi
$C_d$	Aerodinamik sürüklenme katsayısı
$A$	Aracın ön yüzey alanı ( $m^2$ )
$\rho$	Hava yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
$g$	Kütle çekimi sabiti ( $metre/saniye^2$ )
$C_r$	Yuvarlanma direnci katsayısı
$\varphi$	Yolun açısı
$\mu$	Aracın boş ağırlığı (kg)

ARP ve 2A-ARP modellerinde toplam yakıt tüketimini minimize etmek üzere kullanılan amaç fonksiyonları, sırasıyla, (4) ve (5) ile aşağıda gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \sum_{(i,j) \in A \setminus A(C)} (\lambda (k N_e V (c_{ij} / f)) x_{ij} + \gamma \beta f^2 c_{ij} x_{ij} + \gamma \alpha (\mu x_{ij} + l_{ij}) c_{ij}) + \\ & \sum_{(i,j) \in A(C)} (\lambda (k N_e V (c_{ij} / f')) x_{ij} + \gamma \beta f'^2 c_{ij} x_{ij} + \gamma \alpha (\mu x_{ij} + l_{ij}) c_{ij}) \end{aligned} \quad (4)$$

Araç hızının geçilen yaya göre değişmesinden dolayı (4) ile verilen amaç fonksiyonu iki parçadan oluşmaktadır. İlk parça, trafiğin sıkışık olmadığı, depodan müşterilere gidişleri ve müşterilerden depoya dönüşleri içeren yaylar; diğer parça ise, trafiğin sıkışık olduğu, müşteriden müşteriye gidişleri içeren yaylar için yakıt tüketimi hesaplamasıdır. Burada,  $A(C)$  her iki uç noktası da müşteri düğümü olan yaylar kümesini ifade etmektedir.  $f$  ve  $f'$ , sırasıyla, trafiğin sıkışık olmadığı ve sıkışık olduğu alanlardaki araçların hızını göstermektedir.  $I_{ij}$  ise  $i$  düğümünden ayrılırken aracın yükünü ifade eden karar değişkenleridir ( $\forall i, j \in V$ ).

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} (\lambda (k N_e V (c_{ij} / f)) x_{ijk} + \gamma \beta f^2 c_{ij} x_{ijk} + \gamma \alpha (\mu x_{ijk} + l_{ijk}) c_{ij}) + \\ & \sum_{s \in V_s} \sum_{(i,j) \in A'} (\lambda (k N_e V (c'_{ij} / f')) z_{ijs} + \gamma \beta' f'^2 c'_{ij} z_{ijs} + \gamma \alpha (\mu' z_{ijs} + f_{ijs}) c'_{ij}) \end{aligned} \quad (5)$$

(5) ile verilen amaç fonksiyonu ilk parçası birinci aşamadaki yakıt tüketimini diğer parçası ise ikinci aşamadaki yakıt tüketimini hesaplamak üzere iki parçadan oluşmaktadır.  $f$  ve  $f'$ , sırasıyla, birincil ve ikincil kademe araçların hızını göstermektedir. Birinci ve ikinci aşamadaki araçların ön yüzey alanlarının ( $A$ ) farklı olmalarından dolayı  $\beta$  değerleri de farklılık göstermektedir.  $\beta$  birinci kademedeki araçlara,  $\beta'$  ise ikinci kademedeki araçlara ait değerlerdir.  $\mu$  ve  $\mu'$  de benzer şekilde, sırasıyla, birincil ve ikincil kademe araçların boş ağırlıklarını simgelemektedir.

Toplam yakıt tüketimi hesaplamasında kullanılan teknik parametreler Demir vd. (2012)'den alınmıştır ve Tablo 4 ile gösterilmektedir. Ancak, boş ağırlık değerlerinde olduğu gibi, büyük ve küçük araçlara yönelik ön yüzey alanları da farklılık göstermektedir. Büyük araçların ön yüzey alanı 4,68 m<sup>2</sup> iken küçük araçlarınki 2.36 m<sup>2</sup>'dir. Araçların ön yüzey alanları, ön uzunluk ve yükseklik değerlerinin çarpılması yoluyla hesaplanmıştır. Kamyonların yerleşim yerleri dışındaki hız sınırının 80 km/saat, yerleşim yerleri içerisindeki hız sınırının 50 km/saat olmasından dolayı büyük kamyonun ortalama hız değeri 60 km/saat (16,67 metre/saniye); küçük kamyonun ortalama hız değeri ise 30 km/saat (8,33 metre/saniye) olarak kabul edilmiştir. ARP 'de benzer özelliklere sahip 9 adet küçük kamyon bulunmaktadır. Araçlara ait tüm teknik bilgiler araç broşürlerinden temin edilmiştir. Ankara'da 2019 yılında dizel yakıtın litre fiyatı 6,62 TL'dir.<sup>3</sup> Şoförlerin 2019 yılı aylık brüt maaşının yaklaşık 6000 TL olduğu bilgisiyile sürücü ücreti 0,0069 TL/saniye olarak baz alınmıştır<sup>4</sup>. Her iki uyduda da birim elleçleme maliyeti 1 TL'dir.

**Tablo 4: Araç Emisyon Parametrelerine Ait Değerler**

Parametre	$\xi$	$\kappa$	$\psi$	$k$	$Ne$	$V$	$\epsilon$	$\varpi$	$Cd$	$\rho$	$g$	$Cr$	$\varphi$
Değer	1	44	737	0,2	33	5	0,4	0,9	0,7	1,2	9,81	0,01	0

### 3.2.3. Toplam Süre

Toplam süreyi minimize etmek üzere kullanılan amaç fonksiyonları ARP için (6), 2A-ARP için (7) ile sunulmaktadır.

$$\text{Minimize} \quad \sum_{(i,j) \in A \setminus A(C)} (c_{ij}/f)x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A(C)} (c_{ij}/f')x_{ij} \quad (6)$$

$$\text{Minimize} \quad \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} (c_{ij}/f)x_{ijk} + \sum_{s \in V_s} \sum_{(i,j) \in A'} (c'_{ij}/f')z_{ijs} \quad (7)$$

### 3.2.4. Toplam Maliyet

ARP için (8) ile aşağıda verilen toplam maliyet fonksiyonu yakıt ve sürücü maliyetlerini içermektedir. Fonksiyonun parçaları, sırasıyla, trafiğin sıkışık olmadığı alanlardaki yakıt maliyetlerini, trafiğin sıkışık olduğu alanlardaki yakıt maliyetlerini, trafiğin sıkışık olmadığı alanlardaki sürücü maliyetlerini ve trafiğin sıkışık olduğu alanlardaki sürücü maliyetlerini

hesaplamaktadır. Burada  $p$  yakıt fiyatını (TL/litre),  $w$  ise sürücü ücretini (TL/saniye) simgelemektedir.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \sum_{(i,j) \in A \setminus A(C)} (p(\lambda (k N_e V (c_{ij} / f)) x_{ij} + \gamma \beta f^2 c_{ij} x_{ij} + \gamma \alpha (\mu x_{ij} + l_{ij}) c_{ij})) + \\ & \sum_{(i,j) \in A(C)} (p(\lambda (k N_e V (c'_{ij} / f')) x_{ij} + \gamma \beta f'^2 c'_{ij} x_{ij} + \gamma \alpha (\mu x_{ij} + l_{ij}) c'_{ij})) + \\ & \sum_{(i,j) \in A \setminus A(C)} w(c_{ij} / f) x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A(C)} w(c'_{ij} / f') x_{ij} \end{aligned} \quad (8)$$

2A-ARP için (9) ile verilen toplam maliyet fonksiyonu yakıt maliyetlerini, sürücü maliyetlerini ve uydu noktalarında yükleme/boşaltma faaliyetlerinden kaynaklanan elleçleme maliyetlerini içermektedir. Fonksiyonun parçaları, sırasıyla, birinci aşamadaki yakıt maliyetlerini, ikinci aşamadaki yakıt maliyetlerini, birinci aşamadaki sürücü maliyetlerini, ikinci aşamadaki sürücü maliyetlerini ve elleçleme maliyetlerini hesaplamaktadır.  $p$  yakıt fiyatını (TL/litre),  $w$  sürücü ücretini (TL/saniye),  $h_s$  ise  $s$  uydusundaki birim elleçleme maliyetini ( $\forall s \in V_s$ ) simgelemektedir.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} (p(\lambda (k N_e V (c_{ij} / f)) x_{ijk} + \gamma \beta f^2 c_{ij} x_{ijk} + \gamma \alpha (\mu x_{ijk} + l_{ijk}) c_{ij})) + \\ & \sum_{s \in V_s} \sum_{(i,j) \in A'} (p(\lambda (k N_e V (c'_{ij} / f')) z_{ijs} + \gamma \beta f'^2 c'_{ij} z_{ijs} + \gamma \alpha (\mu' z_{ijs} + f_{ijs}) \\ & c'_{ij})) + \\ & \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} w(c_{ij} / f) x_{ijk} + \sum_{s \in V_s} \sum_{(i,j) \in A'} w(c'_{ij} / f') z_{ijs} + \sum_{s \in V_s} h_s t_s \end{aligned} \quad (9)$$

#### 4. BULGULAR

ARP ve 2A-ARP modellerinin tanımlanan veri seti ile dört amaç fonksiyonuna göre kıyaslanmasında kendi içlerinde aynı kısıtlar kümesine sahip modellerle çalışılmıştır. Bir önceki bölümde verilen parametreleri ele alan modellerin bulguları temel durum analizi olarak isimlendirilmiştir. Temel durum analizinden sonra parametreler çeşitlendirilerek 25 farklı senaryo ile duyarlılık analizleri yapılmıştır. Modellerin çözümünde akademik lisanslı *Gurobi 9.1.0* kullanılmıştır. Çözümlerin elde edilmesinde *Intel (R) i7 işlemci 2.4 GHz* hızında *6 GB* belleğe sahip bir bilgisayar kullanılmıştır.

##### 4.1. Temel Durum Analizi

ARP ve 2A-ARP modelleri için elde edilen optimal amaç fonksiyonu değerleri ve rotalar Tablo 5'te sunulmaktadır. Hem ARP hem de 2A-ARP için tüm amaç fonksiyonlarında kendi içinde aynı optimal rotalar gözlemlenmiştir. Optimal çözümde, ARP modelinde 9 araçtan 7 tanesi; 2A-ARP modelinde ise birinci aşamadaki tüm araçlar, ikinci aşamada 9 araçtan 7 tanesi kullanılmaktadır. 2A-ARP çözümünde iki uydu noktasında da birim elleçleme maliyetlerinin aynı olmasına rağmen, birinci uydunun ikinci uyduya göre hem merkezi depoya hem de müşterilerin birçoğuna daha yakın konumda olması nedeniyle, birinci uydu noktasından daha çok araç rotalanmaktadır.

Tablo 5: Temel Durum Analizi Sonuçları

Problem Türü	Rotalar	Toplam Mesafe (Metre)	Toplam Yakıt Tüketimi (Litre)	Toplam Süre (Saniye)	Toplam Maliyet (TL)
ARP	D-C1-D	6.604.042	787	398.592	7.975
	D-C2-D				
	D-C3-D				
	D-C5-C4-C8-D				
	D-C7-C6-D				
	D-C9-D				
	D-C10-D				
2A-ARP	<b>Birinci aşama:</b>	2.344.668	457	169.059	19.201
	D-S1-D				
	D-S2-D				
	<b>İkinci aşama:</b>				
	S1-C1-S1				
	S1-C2-S1				
	S1-C3-S1				
	S1-C5-C4-C8-S1				
	S1-C6-C7-S1				
	S2-C9-S2				
S2-C10-S2					

Tablo 5'te sunulan sonuçlardan hareketle, aynı miktardaki ürünün toplamda daha çok araç kullanılarak dağıtılmasına karşın 2A-ARP'nin toplam maliyet fonksiyonu haricinde tüm amaç fonksiyonlarında daha düşük değerlere sahip olduğu ve dolayısıyla daha avantajlı olduğu görülmektedir. ARP daha çok yakıt ve sürücü maliyetine sebep olsa da 2A-ARP'nin daha yüksek maliyete sahip olmasının sebebi uydu noktalarındaki yükleme/boşaltma faaliyetlerinden kaynaklanan elleçleme maliyetleridir. ARP modelinin görece zayıf performansının sebebi, toplam mesafenin çoğunun depo ile uydu noktaları arasındaki mesafeden oluşması ve bu alanlarda, iki-kademeli dağıtım sistemindeki aksine, düşük kapasiteli araçların kullanılması nedeniyle daha çok aracın kullanımına gerek duyulmasıdır. Bu, ARP'nin modelinin büyük araca sahip olmamasının doğal sonucudur. Bu durum belki ARP modelinin araç kapasitelerinin arttırılması ile çözülebilir, ancak, Bölüm 4.1'de bahsedilen şehir içi kısıtlamalarından dolayı elde edilen çözüm gerçekçi olmayacaktır. Yine de izleyen bölümde bu durum duyarlılık analizi senaryoları tasarlanırken gözetilerek etki test edilmiştir.

#### 4.2. Duyarlılık Analizi

Temel durum analizinden sonra, ARP ve 2A-ARP modellerinde bazı parametrelerdeki değişimin etkisini analiz etmek amacıyla aşağıda Tablo 6'da açıklamaları verilen 25 senaryo ile duyarlılık analizi yapılmıştır. İlk 3 senaryo 2A-ARP modelinin uydu noktalarına ve o noktalarda izin verilen araç sayısına duyarlılığı ile ilgilidir. Temel modelde, araçların 5'i birinci uyduda, 4'ü ikinci uyduda kullanılabildiği varsayılmaktadır. Bu senaryolarda, uydulardan yönlendirilen ikincil kademe araçların uydulardaki dağılımının değiştirilmesi ve yalnızca tek uydunun kullanımına izin verilmesi durumları ile uydu kapasitelerini belirleyen kısıtların modelden çıkarılması durumlarının etkisi ölçülmektedir. Senaryo 4-25 ise talep, araç sayısı ve kapasite ile ilgili değişiklikleri içermektedir ve her iki model için de uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.



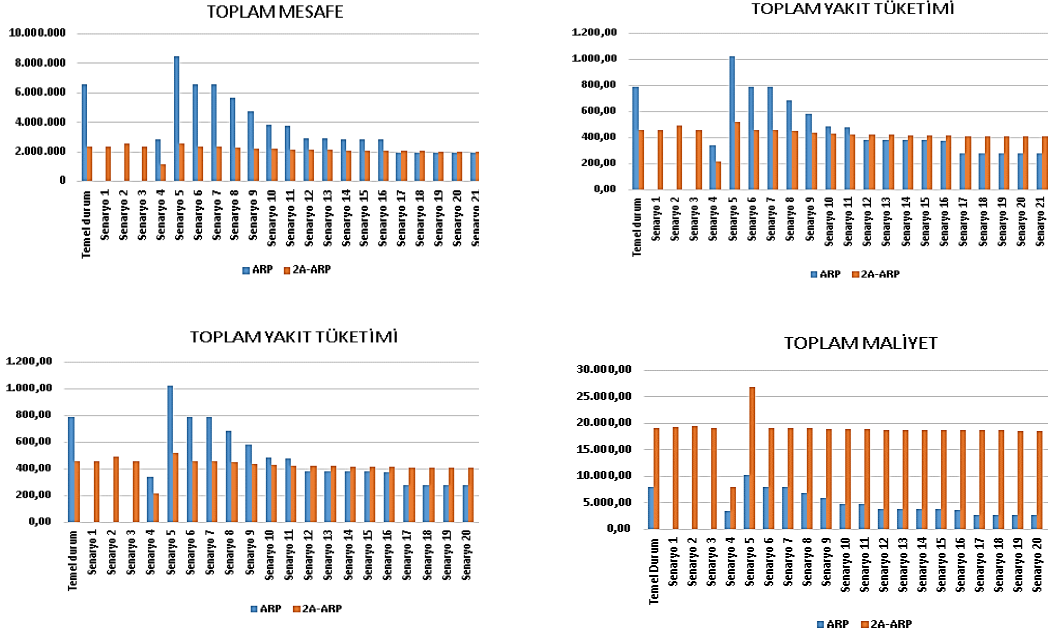
**Tablo 6: Duyarlılık Analizi Senaryoları**

<b>Senaryolar</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>Senaryo 1</b>	Tüm ikincil kademe araçlar (9 adet) birinci uyduda kullanılabilir.
<b>Senaryo 2</b>	Tüm ikincil kademe araçlar (9 adet) ikinci uyduda kullanılabilir.
<b>Senaryo 3</b>	Her bir uyduda kullanılacak araç sayısı kısıtlarının modelden çıkarılması
<b>Senaryo 4</b>	Toplam talep miktarının 15.000'den 6.000'e düşürülmesi
<b>Senaryo 5</b>	Toplam talep miktarının 15.000'den 22.000'e çıkarılması
<b>Senaryo 6</b>	Küçük kamyon sayısının 9'dan 12'ye çıkarılması
<b>Senaryo 7</b>	Küçük kamyon sayısının 9'dan 7'ye düşürülmesi
<b>Senaryo 8</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 3.000'e çıkarılması
<b>Senaryo 9</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 3.500'e çıkarılması
<b>Senaryo 10</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 4.000'e çıkarılması
<b>Senaryo 11</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 4.500'e çıkarılması
<b>Senaryo 12</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 5.000'e çıkarılması
<b>Senaryo 13</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 5.500'e çıkarılması
<b>Senaryo 14</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 6.000'e çıkarılması
<b>Senaryo 15</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 6.500'e çıkarılması
<b>Senaryo 16</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 7.000'e çıkarılması
<b>Senaryo 17</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 7.500'e çıkarılması
<b>Senaryo 18</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 8.000'e çıkarılması
<b>Senaryo 19</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 8.500'e çıkarılması
<b>Senaryo 20</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 9.000'e çıkarılması
<b>Senaryo 21</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 9.500'e çıkarılması
<b>Senaryo 22</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 10.000'e çıkarılması
<b>Senaryo 23</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 10.500'e çıkarılması
<b>Senaryo 24</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 11.000'e çıkarılması
<b>Senaryo 25</b>	Küçük kamyon kapasitelerinin 2.510'dan 11.380'e çıkarılması

Şekil 4'te bütün amaç fonksiyonları ve senaryolar açısından değişim özetlenmektedir. Hem temel durum hem de tüm senaryolar göz önünde bulundurulduğunda (bkz. Şekil 4) 2A-ARP modelinin mesafe, süre ve yakıt tüketimi açısından; ARP modelinin ise maliyet açısından daha avantajlı olduğu söylenebilir. Toplam mesafede Senaryo 17'den sonra kırılım başlamakta diğer bir deyişle, her ne kadar aradaki fark oldukça az olsa da ARP modeli, 2A-ARP modeline göre daha düşük değerler vermektedir. Bunun sebebi, bundan önceki durumlarda ARP modelinde kullanılan araç sayısının, 2A-ARP'de birinci aşamada kullanılan araç sayısından fazla olması ve kırılım noktasında bu sayıların birbirine eşit olması durumudur. Toplam yakıt tüketimi ve toplam süre için kırılım noktaları, sırasıyla, Senaryo 12 ve Senaryo 17'dir. Toplam maliyet için, tüm

durumlarda ARP modelinin daha düşük maliyete sahip olmasından dolayı, kırılım noktası bulunmamaktadır.

**Şekil 4: ARP ve 2A-ARP Amaç Fonksiyonu Değerlerinin Senaryo Bazlı Kıyaslanması**



Duyarlılık analizi kapsamında uygulanan senaryolardaki söz konusu parametrelerde yapılan değişikliklerin optimal çözümlere yönelik etkileri daha detaylı bir biçimde dört grupta ele alınabilir:

**Uydu kapasitelerindeki değişimin etkisi:** İkincil kademedeki tüm araçların sadece tek bir uyduda kullanımına izin vermek 2A-ARP’de tüm amaç fonksiyonlarında artışa sebep olmuştur. Ancak, sadece birinci uydunun kullanımı (Senaryo 1), sadece ikinci uydunun kullanımına (Senaryo 2) göre, daha az artış yaratmıştır. Araçların uydulardaki kullanımına yönelik kısıtların (birinci uydu 5 araç, ikinci uydu 4 araç) modelden çıkarılması (Senaryo 3) durumunda ise temel durumda olduğu gibi birinci uydunun daha fazla kullanılmakta olduğu (merkezi depodan buraya getirilen ürün miktarının daha fazla olması ve dolayısıyla buradan yönlendirilen ikincil kademe araç sayısının daha fazla olduğu), amaç fonksiyonlarında ve rotalarda temel duruma göre bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, birinci uydunun hem merkezi depoya hem de müşterilerin çoğuna daha yakın konumda olmasıdır. Amaç fonksiyonu ve rotalarda bir değişiklik gözlenmemesinden ötürü, bundan sonraki senaryolarda söz konusu kısıtların 2A-ARP modellerinden çıkarılmış hali ile devam edilmiştir.

**Talep miktarlarındaki değişimin etkisi:** Talep miktarlarındaki azalışın (Senaryo 4) daha az araç kullanımını gerektirmesinden dolayı hem ARP hem de 2A-ARP’de tüm amaç fonksiyonu değerlerinde azalış yarattığı gözlemlenmiştir. Talep miktarlarındaki artışın (Senaryo 5) etkisi ise bunun tam tersi yönündedir. Ayrıca, 2A-ARP’de Senaryo 4’te yalnızca birinci uydunun; Senaryo 5’te ise ağırlıklı olarak birinci uydunun kullanıldığı görülmektedir.

**Araç sayılarındaki değişimin etkisi:** Araç sayısında yapılan değişim ARP ve 2A-ARP’de ne amaç fonksiyonu değerlerinde ne de optimal rotalarda herhangi bir değişime sebep olmamıştır.

Modellerin minimizasyon problemi olması ve dolayısıyla mümkün olan en az aracın kullanılması nedeniyle, araç sayısındaki artış da (Senaryo 6) uygun olmayan çözüme sebebiyet vermeyecek bir azalış (Senaryo 7) da, optimal çözümü değiştirmemektedir.

**Araç kapasitelerindeki değişimin etkisi:** Araç kapasitelerindeki artışlar (Senaryo 8-25) hem ARP'de hem de 2A-ARP'de aynı miktardaki ürünün giderek daha az araç vasıtasıyla dağıtılabildiğini mümkün kıldığından tüm amaç fonksiyonlarında azalan değerlerin gözlemlenmesini sağlamaktadır.

İlk üç senaryo hariç tüm senaryolara ve temel duruma bakıldığında 2A-ARP modelinin toplam mesafe, toplam yakıt tüketimi, toplam süre ve toplam maliyet açısından ARP modeline göre daha avantajlı olduğu senaryoların oranı sırası ile %61, %39, %61 ve %0 olarak tespit edilmiştir. 2A-ARP modelinin özellikle mesafe ve sürede daha baskın olduğu gözlemlenmektedir. Bu noktada, yasal sınırlandırmalar ve yasaklar dikkate alındığında, Tablo 6'da verilen senaryolardan Senaryo 11 sonrasının pratikte uygulama alanı bulunmamaktadır. Çoğunlukla ARP modelinin üstünlük gösterdiği bu senaryolardaki araç kapasitelerinin şehir içi dolaşımı yasaklı olduğu dikkate alınmalıdır. Bu senaryolar hariç bakıldığında ise 2A-ARP modeli tüm senaryolarda toplam maliyet hariç bütün amaç fonksiyonları için ARP modeline üstünlük sağlamıştır. Toplam maliyet fonksiyonlarında, ARP modelinde sürücü ve yakıt maliyetleri, 2A-ARP'de ise bu maliyetlere ilaveten uydu noktalarında yükleme/boşaltma faaliyetlerinden kaynaklanan elleçleme maliyetleri hesaba katılmıştır. Dolayısıyla genel anlamda farkı yaratan elleçleme maliyetleridir. Bu noktada, *sürücü ve yakıt maliyetleri hariç maliyetler de hesaba katılrsa idi, toplam maliyet açısından durum değişir miydi?* sorusu gündeme gelmektedir. Bunu test etmek adına, her iki modelde elde olduğu varsayılan araç sayıları ile optimal çözümlerinin rotaladığı (kullandığı) araç sayılarından hareketle, bir yatırım maliyeti kıyaslaması da yapılmıştır. Bir sonraki bölüm bu karşılaştırmanın bulgularını tartışmaktadır.

#### 4.3. Yatırım ve Kiralama Maliyetleri Kıyaslaması

Bu bölümde temel durum ve talep ile araç sayısının etkisinin ölçüldüğü Senaryo 4-7'de elde edilen çözümler kullanılarak modeller yatırım maliyetleri açısından karşılaştırılmaktadır. Araçların ediniminde kiralama ve satın alma olmak üzere iki seçenek mevcuttur. Seçilen senaryolardaki araçlar homojendir ve küçük aracın günlük kiralama ücreti 300 TL, satın alma fiyatı 257.259 TL; büyük aracın ise günlük kiralama ücreti 750 TL, satın alma fiyatı 733.921 TL'dir.<sup>5</sup>

Araçların satın alınması durumunda, kullanılsa dahi filodaki tüm araçlara yönelik yatırım maliyeti söz konusu olmaktadır. Dolayısıyla hesaplama filoda varsayılan araç sayısı üzerinden yapılmalıdır. Satın alma maliyeti açısından ana depodan uydu noktalarına büyük araçlar kullanan 2A-ARP modelinin dezavantajı olacağı aşikardır. Tablo 7, yatırım maliyetlerini ortaya koymaktadır. Beklenen biçimde satın alma durumunda iki aşamalı dağıtım sistemi daha yüksek yatırım maliyetine gereksinim duymaktadır.

**Tablo 7: Araç Yatırım Maliyetleri Açısından Karşılaştırma**

Senaryo	ARP		2A-ARP		
	Filodaki araç sayısı	Toplam yatırım maliyeti (TL)	Filodaki araç sayısı (1. aşama)	Filodaki araç sayısı (2. aşama)	Toplam yatırım maliyeti (TL)
Temel Durum	9	2.315.331	2	9	3.783.173
Senaryo 4	9	2.315.331	2	9	3.783.173
Senaryo 5	9	2.315.331	2	9	3.783.173
Senaryo 6	12	3.087.108	2	12	4.554.950
Senaryo 7	7	1.800.813	2	7	3.268.655
<b>Ortalama</b>		<b>2.366.783</b>			<b>3.834.625</b>

Araçların kiralama durumunda ise hesaplama yalnızca optimal çözümde kullanılması öngörülen yani rotalanan araçlar üzerinden yapılabilir. Tablo 8, aynı senaryolar için bu kez kiralama maliyetleri açısından bir kıyaslama ortaya koymaktadır. Günlük kiralama maliyetleri açısından da ARP modellemesi, 2A-ARP göre maliyet üstünlüğü sağlamaktadır. Sonuç olarak, yalnızca amaç fonksiyonunda dikkate alınan sürücü, yakıt ve elleçleme maliyetleri açısından değil, yatırım ve kiralama maliyetleri açısından da ARP modelleri daha düşük değerlere ulaşmaktadır. Bu değerlendirme sonucunda, *sürücü ve yakıt maliyetleri hariç maliyetler de hesaba katılrsa idi, toplam maliyet açısından durum değişir miydi?* sorusunun cevabı *hayır* olarak alınmıştır.

**Tablo 8: Araç Kiralama Maliyetleri Açısından Karşılaştırma**

Senaryo	ARP		2A-ARP		
	Kullanılan araç sayısı	Toplam kiralama maliyeti (TL)	Kullanılan araç sayısı (1. aşama)	Kullanılan araç sayısı (2. aşama)	Toplam kiralama maliyeti (TL)
Temel Durum	7	2.100	2	7	3.600
Senaryo 4	3	900	1	3	1.650
Senaryo 5	9	2.700	2	9	4.200
Senaryo 6	7	2.100	2	7	3.600
Senaryo 7	7	2.100	2	7	3.600
<b>Ortalama</b>		<b>1.980</b>			<b>3.330</b>

Literatürde ARP ile 2A-ARP'nin kıyaslandığı çalışmaların sayısı oldukça sınırlı olmakla birlikte söz konusu çalışmaların birçoğunda benzer bulgular gözlemlenmektedir. Crainic vd. (2010), literatürde ilk kez, iki-aşamalı dağıtım sistemleri için, örneklemedeki parametrelerin (müşteri dağılımı, ana deponun ve uydu noktalarının yeri, uydu sayısı, uyduların ortalama erişilebilirliği ve uydu ve müşteriler arasındaki ortalama taşıma maliyetleri) toplam maliyet üzerine etkisini analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda yeni uyduların açılmasının, minimum maliyete ulaşılan kadar genel maliyetleri azalttığı ancak bu noktadan itibaren dağıtım ağına yeni

uyduların eklenmesinin genel maliyetleri arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, çoğu durumda, özellikle de ana deponun müşterilerin bulunduğu alanın dışında konumlandırıldığı ve uyduların da depo ile müşteriler arasındaki bir yerde olması durumunda, 2A-ARP'nin ARP'ye göre daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Crainic vd. (2012), seyahat maliyetlerinin hesaplanmasında yalnızca mesafelere göre değil aynı zamanda yayların (yolların) kullanılması durumunda sabit maliyetler, operasyonel maliyetler ve çevresel maliyetler gibi bileşenlerin de dikkate alındığı ve böylelikle kentsel alanlardaki yük teslimatının daha gerçekçi ve kapsamlı bir boyutta yansıtıldığı bir çalışma ortaya koymuşlardır. Ayrıca, maliyetin bu farklı bileşenlerinin uydu konumunu nasıl etkilediği ve iki-aşamalı yaklaşımın tek-aşamalı yaklaşıma göre baskın gelip gelmediği veya hangi durumlarda baskın geldiği çeşitli senaryolarla analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, tüm senaryolarda 2A-ARP'nin ARP'ye göre ortalama %55 daha az maliyete sahip olduğunu göstermiştir. Soysal vd. (2015), ARP ve 2A-ARP modellerini toplam mesafe, toplam süre, toplam yakıt tüketimi ve toplam maliyet olmak üzere 4 amaç fonksiyonu ile karşılaştırmışlardır. İki-aşamalı sistemlerin tek-aşamalı sistemlere göre daha çevre dostu sonuçlar üretmesine karşılık daha maliyetli olduğu sonucuna varılmıştır. Belgin vd. (2018), Türkiye'deki bir süpermarket zincirinin ürün dağıtımını için tek-aşamalı ve iki-aşamalı dağıtım sistemlerini kıyaslamışlar ve iki-aşamalı dağıtım sistemlerinin daha üstün olduğu sonucuna varmışlardır. Esmaili ve Sahraeian (2019), dayanıksız ürünlerin dağıtımını için tek-aşamalı ve iki-aşamalı dağıtım sistemlerini toplam seyahat maliyetini, müşterilerin toplam bekleme süresini ve toplam karbondioksit emisyon değerlerini minimize etmek üzere 3 amaç fonksiyonu ile çeşitli örneklem boyutlarında kıyaslamışlardır. Sonuçlar, küçük boyutlu örneklerde, tek-kademeli dağıtım sistemlerinin iki-kademeli dağıtım sistemlerine göre daha iyi sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Ancak, orta boyutlu örneklerde karbondioksit emisyon değerlerinde; büyük boyutlu örneklerde ise müşteri bekleme sürelerinde iki-kademeli dağıtım sistemlerinin daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir.

## 5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Lojistik yönetiminin bir parçası olan dağıtım faaliyetlerinde araç rotalarının belirlenmesi hem maliyetler hem de çevresel faktörler açısından oldukça önemlidir. Son dönemde, çok-kademeli dağıtım sistemleri kapsamında İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (2A-ARP) uygulamaları ivme kazanmaktadır. Bu çalışma, İki-Aşamalı Araç Rotalama probleminin temel yaklaşımları, çözüm eğilimleri, uygulaması ve klasik araç rotalama probleminden farklarını ele alarak bu güncel problem alanına kapsamlı bir bakış açısı ortaya koymaktadır. Çalışma kapsamında öncelikle, literatürde yer alan 66 adet 2A-ARP uygulaması çözüm yaklaşımları açısından sınıflanarak metodolojik detayları tasnif edilmiştir (bkz. Tablo E1). Daha sonra, bir gerçek hayat uygulaması dizayn edilerek, Araç Rotalama Problemi (ARP) ve İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (2A-ARP) dağıtım ağı performansı açısından önemli kriterler olan *mesafe*, *yakıt tüketimi*, *süre* ve *maliyet* unsurlarına göre karşılaştırılmıştır. Kapasite kısıtlı modeller üzerinden tasarlanan bu karşılaştırmalar yapılırken uydu kapasiteleri, talep miktarları, araç sayıları ve araç kapasiteleri olmak üzere, parametrelerde yapılan değişim ile oluşturulmuş 25 senaryo kapsamında duyarlılık analizi yapılmış ve sonuçları gözlenmiştir. Ek olarak, araçların kiralama ve yatırım maliyetleri de göz önünde bulundurularak kıyaslama yapılmıştır. ARP ve 2A-ARP modellerinin kıyaslaması kapsamında yapılan analizler aşağıda özetlenen bulgulara işaret etmektedir:

- Aynı miktardaki ürünün toplamda daha çok araç kullanılarak dağıtılmasına karşın 2A-ARP'nin toplam maliyet fonksiyonu haricinde tüm amaç fonksiyonlarında (mesafe, yakıt tüketimi, süre, maliyet) daha düşük değerlere sahip olduğunu ve dolayısıyla daha avantajlıdır.
- Her ne kadar ARP daha çok yakıt ve sürücü maliyetine sebep olsa da 2A-ARP'nin uydu noktalarındaki yükleme/boşaltma faaliyetlerinden kaynaklanan elleçleme maliyetinden dolayı daha yüksek toplam maliyete sahiptir.
- İkincil kademedeki tüm araçların sadece tek bir uyduda kullanımına izin verilmesinin 2A-ARP'de tüm amaç fonksiyonlarında artışa sebep olmaktadır.
- 2A-ARP'de sadece birinci uydunun kullanımına izin vermenin, sadece ikinci uydunun kullanımına izin verilmesine göre daha az artış yaratmaktadır.
- 2A-ARP'de araçların uydulardaki kullanımına yönelik kısıtların modelden çıkarılması durumunda temel durumda olduğu gibi birinci uydunun daha fazla kullanılmakta olduğunu (birinci uydunun hem merkezi depoya hem de müşterilerin çoğuna daha yakın konumda olmasından dolayı), amaç fonksiyonu değerlerinde ve rotalarda değişim olmamaktadır.
- Talep miktarlarındaki azalışın daha az araç kullanımını gerektirmesinden dolayı hem ARP hem de 2A-ARP'de tüm amaç fonksiyonu değerlerinde azalış yarattığını, talep miktarlarındaki artışın ise bunun tam tersi yönündedir.
- Modellerin minimizasyon problemi olması ve dolayısıyla mümkün olan en az aracın kullanılması nedeniyle, araç sayısındaki artışın da uygun olmayan çözüme sebebiyet vermeyecek bir azalışın da ARP ve 2A-ARP'de ne amaç fonksiyonu değerlerinde ne de optimal rotalarda herhangi bir değişime sebep olmamaktadır.
- Araç kapasitelerindeki artışların hem ARP'de hem de 2A-ARP'de aynı miktardaki ürünün daha az araç vasıtasıyla dağıtılabilmesini mümkün kıldığından tüm amaç fonksiyonu değerlerinin azalmaktadır.
- 2A-ARP'nin hem filoda bulunan hem de kullanılan araç sayısının daha fazla olmasından dolayı ARP'ye göre daha fazla yatırım ve kiralama maliyetine sebep olmaktadır.
- Tek-kademeli dağıtım sistemlerinin daha az maliyetli; iki-kademeli dağıtım sistemlerinin ise daha çevre dostu sonuçlar üretmektedir.

Çalışmanın uygulama tasarımının varsayımları altında tek-kademeli dağıtım sistemlerinin daha az maliyetli; iki-kademeli dağıtım sistemlerinin ise daha az süreli, daha az mesafe kat eden ve daha az yakıt tüketen sonuçlar ürettiği gözlenmektedir. Maliyet açısından kısa vadeli dönemde tek-kademeli dağıtım sistemleri avantajlı görünse de daha geniş ve daha uzun vadeli bir çerçevede düşünüldüğünde, süre, mesafe ve yakıt tüketimi bakımından iki-kademeli sistemler daha sürdürülebilir sonuçlara işaret etmektedir. Literatürdeki artan eğilim de bu durumu desteklemektedir. Bu bağlamda, İki-Aşamalı Araç Rotalama problemine kapsamlı bir bakış sunan bu çalışma kapsamında ortaya koyan tasnif ve karşılaştırma bulguları yaklaşımın gelecekteki uygulamaları için yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

## NOTLAR

---

<sup>1</sup> Kasım 2019 tarihinde <https://www.google.nl/maps> adresinden erişilmiştir.

<sup>2</sup> Aralık 2019 tarihinde <https://www.ankara.bel.tr/ukome-kararlari> adresinden erişilmiştir. Aralık 2019 tarihinde <https://www.enakliyat.com.tr/makale/kamyonların-trafiğe-cikis-saatleri-ve-cezalar> adresinden erişilmiştir.

Aralık 2019 tarihinde <http://www.kto.org.tr/print.php?type=1&id=1881> adresinden erişilmiştir.

<sup>3</sup> <https://www.aytemiz.com.tr/faaliyet-alanlari-hizmetler/istasyonlar-hakkında/akaryakit-ve-pompa-fiyatları/yakit-fiyatları>, Erişim Tarihi: Aralık 2019.

<sup>4</sup> Ocak 2020 tarihinde <https://www.randstad.com.tr/reports/ucretler-yan-haklar-isyeri-egilimleri-raporu/ik-trendleri-ve-ucret-raporu-2019.pdf> adresinden erişilmiştir.

<sup>5</sup> Araçların kiralama ücretleri Kasım 2020 tarihinde <https://www.sahibinden.com> adresinden satın alma fiyatları ise araçların fiyat listesi kataloğundan temin edilmiştir.

\*\* **TP**: Tamsayı Programlama, **KTP**: Karma Tamsayı Programlama, **KTDP**: Karma Tamsayı Doğrusal Programlama, **KTDP**: Karma Tamsayı Doğrusal Olmayan Programlama.

---

## YAZAR BEYANI

### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Bu çalışma bilimsel araştırma ve yayın etiği kurallarına uygun olarak hazırlanmıştır.

### Yazar Katkıları

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkıda bulunmuştur.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar açısından ya da üçüncü taraflar açısından çalışmadan kaynaklı çıkar çatışması bulunmamaktadır.

---

## KAYNAKÇA

Agardi, A., Kovacs, L., & Banyai, T. (2019). Two-echelon vehicle routing problem with recharge stations. *Transport and Telecommunication*, 20(4), 305-317. <https://doi.org/10.2478/ttj-2019-0025>

Anderluh, A., Hemmelmayr, V. C., & Nolz, P. C. (2017). Synchronizing vans and cargo bikes in a city distribution network. *Central European Journal of Operations Research*, 25(2), 345-376. <https://doi.org/10.1007/s10100-016-0441-z>

Anderluh, A., Larsen, R., Hemmelmayr, V. C., & Nolz, P. C. (2019). Impact of travel time uncertainties on the solution cost of a two-echelon vehicle routing problem with Synchronization. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 806-828. <https://doi.org/10.1007/s10696-019-09351-w>

- Anderluh, A., Nolz, P. C., Hemmelmayr, V. C., & Crainic, T. G. (2021). Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and 'Grey Zone' customers arising in urban logistics. *European Journal of Operational Research*, 940-958. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.07.049>
- Angelelli, E., & Speranza, M. G. (2002). The periodic vehicle routing problem with intermediate facilities. *European Journal of Operational Research*, 137(2), 233-247. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00206-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00206-5)
- Babae Tirkolaee, E., Hadian, S., & Golpira, H. (2019). A Novel multi-objective model for two-Echelon green routing problem of perishable products with intermediate depots. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 6(2), 196-213. <https://doi.org/10.22116/JIEMS.2019.94158>
- Babagolzadeh, M., Shrestha, A., Abbasi, B., Zhang, S., Atefi, R., & Woodhead, A. (2019). Sustainable open vehicle routing with release-time and time-window: A two-echelon distribution system. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 571-576. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.219>
- Baldacci, R., Battarra, M., & Vigo, D. (2008). Routing a heterogeneous fleet of vehicles in the vehicle routing problem. *Latest Advances and New Challenges*, Springer, 3-27.
- Baldacci, R., Mingozzi, A., Roberti, R., & Clavo, R. W. (2013). An Exact algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Operations Research*, 61(2), 298-314. <https://doi.org/10.1287/opre.1120.1153>
- Bard, J. F., & Nananukul, N. (2009). Heuristics for a multiperiod inventory routing problem with production decisions. *Computers & Industrial Engineering*, 57(3), 713-723. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.01.020>
- Behnke, M., Kirschstein, T., & Bierwirth, C. (2021). A Column generation approach for an emission-oriented vehicle routing problem on a multigraph. *European Journal of Operational Research*, 288(3), 794-809. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.06.035>
- Belgin, Ö. (2017). İki aşamalı eş zamanlı topla-dağıt araç rotalama problemi için çözüm yaklaşımları. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Belgin, Ö., Karaoglan, I., & Altıparmak, F. (2018). Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and heuristic approach. *Computers & Industrial Engineering*, 115, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.032>
- Bent, R., & Van Hentenryck, P. (2004). A Two-stage hybrid local search for the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*, 38(4), 515-530. <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0049>
- Bevilaqua, A., Bevilaqua, D., & Yamanaka, K. (2019). Parallel island based memetic algorithm with Lin-Kernighan local search for a real-life two-echelon heterogeneous vehicle routing problem based on Brazilian wholesale companies. *Applied Soft Computing Journal*, 76, 697-711. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.12.036>



- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuysse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300-313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
- Breunig, U., Schmid, V., Hartl, R. F., & Vidal, T. (2015). A Fast large neighbourhood based heuristic for the two-echelon vehicle routing problem. Working Paper.
- Breunig, U., Schmid, V., Hartl, R. F., & Vidal, T. (2016). A Large neighbourhood based heuristic for two-echelon routing problems. *Computers & Operations Research*, 76, 208-225. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.06.014>
- Breunig, U., Baldacci, R., Hartl, R. F., & Vidal, T. (2019). The electric two-echelon vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 103, 198-210. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.11.005>
- Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D., & González-Feliu, J. (2017). Vehicle routing problems for city logistics. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6(1), 51-79. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0074-0>
- Christofides, N., Mingozzi, A., & Toth, P. (1981). Exact algorithms for the vehicle routing problem, based on spanning tree and shortest path relaxations. *Mathematical Programming*, 20(1), 255-282. <https://doi.org/10.1007/BF01589353>
- Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4), 568-581. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
- Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R. (2008). Clustering-based heuristics for the two-echelon vehicle routing problem. *Teknik rapor*, CIRRELT-2008-46, Montreal, Canada.
- Crainic, T. G., Perboli, G., Mancini, S., & Tadei, R. (2010). Two-echelon vehicle routing problem: A satellite location analysis. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 5944-5955. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.009>
- Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R. (2011). Multi-start heuristics for the two-echelon vehicle routing problem. *11th European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, Torino (IT), 27-29 Nisan, 179-190. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20364-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20364-0_16)
- Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R. (2012). Impact of generalized travel costs on satellite location in the two-echelon vehicle routing problem. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 39, 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.101>
- Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R. (2013). GRASP with path relinking for the two-echelon vehicle routing problem. In: *Advances in Metaheuristics: Operations Research / Computer Science Interfaces Series*, Springer, NewYork, 53, 113-125. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6322-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6322-1_7)
- Cuda, R., Guastaroba, G., & Speranza, M. G. (2015). A Survey on two-echelon routing problems, *Computers & Operations Research*, 55, 185-199. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.06.008>

- Çetinkaya, C., Karaoglan, I., & Gökçen, H. (2013). Two-stage vehicle routing problem with arc time windows: a mixed integer programming formulation and a heuristic approach. *European Journal of Operational Research*, 230(3), 539-550. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.05.001>
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1), 80-91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- Dellaert, N., Dashty Saridarq, F., Van Woensel, T., & Crainic, T. G. (2016). Branch & price based algorithms for the two-echelon vehicle routing problem with time windows. *Teknik rapor*, CIRRELT-2016-45, Montreal, Canada. <https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0844>
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2012). An Adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 346-359. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.06.044>
- Eitzen, H., Lopez-Pires, F., Baran, B., Sandoya, F., & Chicaiza, J. L. (2017). A Multi-objective two-echelon vehicle routing problem. An Urban Goods Movement Approach for Smart City Logistics. In *2017 XLIII Latin American Computer Conference (CLEI)*, 4-8 Eylül, 1-10. <https://doi.org/10.1109/CLEI.2017.8226454>
- Enthoven, D. L., Jargalsaikhan, B., Roodbergen, K. J., uit het Broek, M. A., & Schrottenboer, A. H. (2020). The two-echelon vehicle routing problem with covering options: city logistics with cargo bikes and parcel lockers. *Computers & Operations Research*, 118, 104919. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104919>
- Esmaili, M., & Sahraeian, R. (2017). A New bi-objective model for a two-echelon capacitated vehicle routing problem for perishable products with the environmental factor. *International Journal of Engineering*, 30(4), 523-531. <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2017.30.04a.10>
- Esmaeili, M., & Sahraeian, R. (2019). Comparing two-echelon and single-echelon multi-objective capacitated vehicle routing problems. *Journal of Quality Engineering and Production Optimization*, 4(1), 1-16. <https://doi.org/10.22070/JQEPO.2019.3262.1066>
- Fukasawa, R., Longo, H., Lysgaard, J., De Aragao, M. P., Reis, M., Uchoa, E., & Werneck, R. F. (2006). Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical Programming*, 106(3), 491-511. <https://doi.org/10.1007/s10107-005-0644-x>
- Gonzalez-Feliu, J. (2008). Models and methods for the city logistics: The two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Doktora Tezi*, Politecnico di Torino, Turin, İtalya.
- Gonzalez-Feliu, J., Perboli, G., Tadei, R., & Vigo, D. (2008). The two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Teknik Rapor*, Politecnico di Torino, İtalya.
- Grangier, P., Gendreau, M., Lehuédé, F., & Rousseau, L. M. (2016). An Adaptive large neighborhood search for the two-echelon multiple-trip vehicle routing problem with satellite synchronization. *European Journal of Operational Research*, 254(1), 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.040>

- He, P., & Li, J. (2019). The two-echelon multi-trip vehicle routing problem with dynamic satellites for crop harvesting and transportation. *Applied Soft Computing Journal*, 77, 387-398. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.01.040>
- Hemmelmayr, V. C., Cordeau, J. F., & Crainic, T. G. (2012). An Adaptive large neighborhood search heuristic for two-echelon vehicle routing problems arising in city logistics. *Computers & Operations Research*, 39(12), 3215-3228. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.04.007>
- Jepsen, M., Spoorendonk, S., & Ropke, S. (2013). A Branch-and-cut algorithm for the symmetric two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Transportation Science*, 47(1), 23-37. <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0399>
- Jie, W., Yang, J., Zhang, M., & Huang, Y. (2019). The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: Formulation and efficient methodology. *European Journal of Operational Research*, 272(3), 879-904. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.002>
- Jin, M., Liu, K., & Eksioğlu, B. (2008). A Column generation approach for the split delivery vehicle routing problem. *Operations Research Letters*, 36(2), 265-270. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2007.05.012>
- Kancharla, S. R., & Ramadurai, G. (2019). Multi-Depot Two-Echelon Fuel Minimizing Routing Problem with Heterogeneous Fleets: Model and Heuristic. *Networks and Spatial Economics*, 19(3), 969-1005. <https://doi.org/10.1007/s11067-018-9437-7>
- Kitjacharoenchai, P., Min, B. C., & Lee, S. (2020). Two echelon vehicle routing problem with drones in last mile delivery. *International Journal of Production Economics*, 225, 107598. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107598>
- Kumar, S. N., & Panneerselvam, R. (2012). A Survey on the vehicle routing problem and its variants. *Intelligent Information Management*, 4, 66-74. <https://doi.org/10.4236/iim.2012.43010>
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345-358. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90192-C](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C)
- Li, H., Zhang, L., Lv, T., & Chang, X. (2016a). The two-echelon time-constrained vehicle routing problem in linehaul-delivery systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 94, 169-188. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.09.012>
- Li, H., Yuan, J., Lv, T., & Chang, X. (2016b). The Two-echelon time-constrained vehicle routing problem in linehaul-delivery systems considering carbon dioxide emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 49, 231-245. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.002>
- Li, H., Liu, Y., Jian, X., & Lu, Y. (2018). The two-Echelon Distribution System Considering the Real-Time Transshipment Capacity Varying. *Transportation Research Part B: Methodological*, 110, 239-260. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.02.015>

- Li, H., Bai, M., Zhao, Y., & Dai, C. (2019). Vehicle flow formulation for two-echelon time-constrained vehicle routing problem. *Journal of Management Science and Engineering*, 4(2), 75-90. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2019.05.006>
- Li, H., Liu, Y., Chen, K., & Lin, Q. (2020a). The two-echelon city logistics system with on-street satellites. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105577. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.024>
- Li, H., Wang, H., Chen, J., & Bai, M. (2020b). Two-echelon vehicle routing problem with time windows and mobile satellites. *Transportation Research Part B*, 138, 179-201. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.05.010>
- Liu, R., Tao, Y., Hu, Q., & Xie, X. (2017). Simulation-based optimisation approach for the stochastic two-echelon logistics problem. *International Journal of Production Research*, 55(1), 187-201. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1201221>
- Liu, T., Luo, Z., Qin, H., & Lim, A. (2018). A Branch-and-cut algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem with grouping constraints. *European Journal of Operational Research*, 266(2), 487-497. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.017>
- Liu, Y., Gao, B., Liu, H., & Wei, M. (2019). Optimal production, delivery and inventory policies for perishable products with replenishment lead time in two-echelon distribution network. *In 2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, Nisan, 262-266. <https://doi.org/10.1109/IEA.2019.8714984>
- Liu, Y., Liu, Z., Shi, J., Wu, G., & Pedrycz, W. (2020). Two-echelon routing problem for parcel delivery by cooperated truck and dron. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51(12), 7450-7465. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2020.2968839>
- Marques, G., Sadykov, R., Deschamps, J. C., & Dupas, R. (2020). An Improved branch-cut-and-price algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 114, 104833. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104833>
- Martins, L.C., Hirsch, P., & Juan, A. (2021). Agile optimization of a two-echelon vehicle routing problem with pickup and delivery. *International Transactions in Operational Research*, 28(1), 201-221. <https://doi.org/10.1111/itor.12796>
- Meihua, W., Xuhong, T., Shan, C., & Shumin, W. (2011). Hybrid ant colony optimization algorithm for two echelon vehicle routing problem. *Procedia Engineering*, 15, 3361-3365. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.630>
- Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E., & Villegas, J. G. (2016). A Multi-space sampling heuristic for the green vehicle routing problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 70, 113-128. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.09.009>
- Ombuki, B., Ross, B. J., & Hanshar, F. (2006). Multi-objective genetic algorithms for vehicle routing problem with time windows. *Applied Intelligence*, 24(1), 17-30. <https://doi.org/10.1007/s10489-006-6926-z>
- Penna, P. H. V., Subramanian, A., & Ochi, L. S. (2013). An Iterated local search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Journal of Heuristics*, 19(2), 201-232. <https://doi.org/10.1007/s10732-011-9186-y>

- Perboli, G., Tadei, R., & Masoero, F. (2009a). Valid inequalities for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Teknik rapor*, CIRRELT-2009-39, Montreal, Canada.
- Perboli, G., Tadei, R., & Masoero, F. (2009b). Models and cuts for the two-echelon vehicle routing problem. *In Proceedings of the International Network Optimization Conference*.
- Perboli, G., Tadei, R., & Masoero, F. (2010). New families of valid inequalities for the two-echelon vehicle routing problem. *In Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 36, 639-646. <https://doi.org/10.1016/j.endm.2010.05.081>
- Perboli, G., Tadei, R., & Vigo, D. (2011). The two-echelon capacitated vehicle routing problem: models and math-based heuristics. *Transportation Science*, 45(3), 364-380. <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0368>
- Perboli, G., Tadei, R., & Fadda, E. (2018). New valid inequalities for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 64, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.endm.2018.01.009>
- Sahraeian, R., & Esmaeili, M. (2018). A Multi-objective two-echelon capacitated vehicle routing problem for perishable products. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 11(2), 62-84.
- Santos, F. A., da Cunha, A. S., & Mateus, G. R. (2013). Branch-and-price algorithms for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Optimization Letters*, 7, 1537-1547. <https://doi.org/10.1007/s11590-012-0568-3>
- Savelsbergh, M., & Van Woensel, T. (2016). 50th Anniversary invited article-city logistics: challenges and opportunities. *Transportation Science*, 50(2), 579-590. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0675>
- Sitek, P., & Wikarek, J. (2014). A Novel integrated approach to the modelling and solving of the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Production & Manufacturing Research*, 2(1), 326-340. <https://doi.org/10.1080/21693277.2014.910716>
- Soriano, A., Vidal, T., Gansterer, M., & Doerner, K. (2020). The vehicle routing problem with arrival time diversification on a multigraph. *European Journal of Operational Research*, 286(2), 564-575. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.03.061>
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Bektaş, T. (2015). The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations. *International Journal of Production Economics*, 164, 366-378. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.11.016>
- Su, B., Zhou, J., Zhou, L., Ji, H., & Lin, G. (2019). Approximate algorithm for two-echelon vehicle routing. *In 2019 International Conference on Economic Management and Model Engineering (ICEMME)*, Aralık, 425-443. <https://doi.org/10.1109/ICEMME49371.2019.00092>
- Tarantilis, C. D., Loannou, G., Kiranoudis, C. T., & Prastacos, G. P. (2005). Solving the open vehicle routing problem via a single parameter metaheuristic algorithm. *Journal of the Operational Research Society*, 56(5), 588-596. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601848>

- Toth, P., & Vigo, D. (2014). *Vehicle Routing Problems, Methods and Applications*, 2. Edition, SIAM.
- Treitl, S., Nolz, P. C., & Jammerneegg, W. (2012). Incorporating environmental aspects in an inventory routing problem. A Case Study from the Petrochemical Industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 26(1-2), 143-169. <https://doi.org/10.1007/s10696-012-9158-z>
- Vidal, T., Laporte, G., & Matl, P. (2020). A Concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants. *European Journal of Operational Research*, 286(2), 401-416. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.010>
- Wang, K., Lan, S., & Zhao, Y. (2017). A genetic-algorithm-based approach to the two-echelon capacitated vehicle routing problem with stochastic demands in logistics service. *Journal of the Operational Research Society*, 68(11), 1409-1421. <https://doi.org/10.1057/s41274-016-0170-7>
- Wang, D., Zhou, H., & Feng, R. (2019). A Two-echelon vehicle routing problem involving electric vehicles with time windows. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1324(1), 012071. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1324/1/012071>
- Wang, Y., Yuan, Y., Guan, X., Xu, M., Wang, L., Wang, H., & Liu, Y. (2020). Collaborative two-echelon multicenter vehicle routing optimization based on state-space-time network representation. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120590>
- Wang, Z., & Wen, P. (2020). Optimization of a low-carbon two-echelon heterogeneous-fleet vehicle routing for cold chain logistics under mixed time window. *Sustainability*, 12(5), 1967. <https://doi.org/10.3390/su12051967>
- Wei, M., Guan, H., Liu, Y., Gao, B., & Zhang, C. (2020). Production, replenishment and inventory policies for perishable products in a two-echelon distribution network. *Sustainability*, 12, 4735. <https://doi.org/10.3390/su12114735>
- Yan, X., Huang, H., Hao, Z., & Wang, J. (2020). A Graph-based fuzzy evolutionary algorithm for solving two-echelon vehicle routing problems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 24(1), 129-141. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2019.2911736>
- Zeng, Z. Y., Xu, W. S., & Xu, Z. Y. (2013). A Two-phase hybrid heuristic for the two-echelon vehicle routing problem. In *2013 Chinese Automation Congress*, Kasım, 625-630. <https://doi.org/10.1109/CAC.2013.6775811>
- Zeng, Z. Y., Xu, W. S., Xu, Z. Y., & Shao, W. H. (2014). A hybrid grasp+ vnd heuristic for the two-echelon vehicle routing problem arising in city logistics. *Mathematical Problems in Engineering*, 517467. <https://doi.org/10.1155/2014/517467>
- Zhou, L., Baldacci, R., Vigo, D., & Wang, X. (2018). A Multi-depot two-echelon vehicle routing problem with delivery options arising in the last mile distribution. *European Journal of Operational Research*, 265, 765-778. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.011>

EK

**Tablo E1: 2A-ARP Üzerine Yapılan Çalışmaların Kullanmış Oldukları Çözüm Metotları**

Kategori	Çalışma	Kullanılan Çözüm Metotlar**
Kesin	Gonzalez-Feliu (2008)	Akış-temelli matematiksel model, geçerli eşitsizlikler, sütun oluşturma prosedürü
	Gonzalez-Feliu vd. (2008)	Akış-temelli matematiksel model, geçerli eşitsizlikler
	Perboli vd. (2009a)	Şebeke akış formülizasyonlu matematiksel model, geçerli eşitsizlikler, dal ve kesme algoritması
	Perboli vd. (2009b)	Geçerli eşitsizlikler, dal ve kesme algoritması
	Perboli vd. (2010)	Geçerli eşitsizlikler, dal ve kesme algoritması
	Baldacci vd. (2013)	Matematiksel model, dinamik programlamaya dayalı sınırlandırma prosedürünü içeren (çift-çıkış yöntemi) ve problemi sınırlı sayıda çok depolu ARP'ye ayırıştırarak kesin bir çözüm algoritması
	Jepsen vd. (2013)	Kenar akış formülizasyonlu matematiksel model, geçerli eşitsizlikler, dal ve kesme algoritması
	Santos vd. (2013)	TP modeli, dal ve fiyat algoritması
	Sitek ve Wikarek (2014)	KTDP ve mantıksal kısıt programlamayı bir arada kullanan entegre bir yaklaşım
	Cuda vd. (2015)	KTDP modeli
	Soysal vd. (2015)	KTDP modeli, geçerli eşitsizlikler
	Dellaert vd. (2016)	Patika-temelli matematiksel model, dal ve fiyat algoritması
	Eitzen vd. (2017)	Matematiksel model
	Esmaili ve Sahraeian (2017)	KTP modeli



Tablo E1'in devamı

Kategori	Çalışma	Kullanılan Çözüm Metotları
Kesin	Perboli vd. (2018)	KTP modeli, geçerli eşitsizlikler, dal ve kesme algoritması
	Babae Tirkolaee vd. (2019)	KTDP modeli
	Babagolzadeh vd. (2019)	KTDP modeli
	Liu vd. (2019)	KTP modeli
	Wang vd. (2019)	KTDP modeli
	Wei vd. (2020)	KTP modeli, geçerli eşitsizlikler, dal ve kesme algoritması
Sezgisel / Metasezgisel	Crainic vd. (2008)	Kümeleme ve çok-depolu ARP yaklaşımına dayanan metasezgisel algoritmalar, ayrık-büyük-rota sezgiseli, ekleme sezgiseli, değiş tokuş sezgiseli
	Crainic vd. (2011)	Çoklu-başlangıç sezgiselleri
	Meihua vd. (2011)	Geliştirilmiş karınca kolonisi optimizasyonu, çoklu komşuluk inişi ve eşik-temelli yerel arama sezgisellerini içeren karma bir karınca kolonisi optimizasyonu algoritması
	Crainic vd. (2012)	Hızlı kümeleme sezgiseli
	Hemmelmayr vd. (2012)	Uyarlanabilir büyük komşu arama sezgiseli
	Crainic vd. (2013)	Açgözlü rastgele uyarlanabilir arama prosedürü ve patika yeniden bağlama algoritmasını birleştiren metasezgisel algoritma
	Zeng vd. (2013)	Açgözlü rastgele uyarlanabilir arama prosedürü ve değişken komşu inişi algoritmalarını birleştiren iki-aşamalı karma bir sezgisel yöntem
	Zhou vd. (2018)	Karma genetik arama ve uyarlanabilir çeşitlilik kontrolü metasezgiseli tabanlı karma çok-popülasyonlu genetik algoritma
	Anderluh vd. (2019)	Açgözlü rastgele uyarlanabilir arama ve patika yeniden bağlama prosedürleri
	Bevilaqua vd. (2019)	Lin-Kernighan sezgiseli tabanlı yerel arama prosedürü ile ada tabanlı memetik algoritma
	Yan vd. (2020)	Grafik tabanlı bulanık evrimsel algoritma
	Martins vd. (2021)	Hızlı yapıcı sezgiseli ile yanlı rastgele algoritması



**Tablo E1'in devamı**

<b>Kategori</b>	<b>Çalışma</b>	<b>Kullanılan Çözüm Metotları</b>
<b>Karma</b>	Crainic vd. (2010)	Dal ve kesme algoritması, hızlı kümeleme sezgiseli
	Perboli vd. (2011)	Akış-temelli matematiksel model, geçerli eşitsizlikler, dal ve kesme algoritması, metasezgisel algoritmalar
	Çetinkaya vd. (2013)	KTP modeli, geçerli eşitsizlikler, memetik algoritma tabanlı sezgisel algoritma
	Zeng vd. (2014)	Matematiksel model, ağgözlü rastgele uyarlanabilir arama prosedürü ile değişken komşu inişi algoritmalarını birleştiren karma bir sezgisel yöntem
	Breunig vd. (2015)	Matematiksel model, büyük komşu arama algoritmasına dayalı yerel arama metasezgiseli
	Breunig vd. (2016)	Matematiksel model, numaralandırmalı yerel arama ile yok etme-ve-onarma prensiplerini birleştiren büyük komşu arama tabanlı metasezgisel yöntem
	Grangier vd. (2016)	KTDP modeli, uyarlanabilir büyük komşu arama sezgiseli
	Li vd. (2016a)	KTDP ve KTDOP modeli, Clarke ve Wright tasarruf algoritması ve yerel arama algoritmalarının kullanıldığı iki-aşamalı bir sezgisel algoritma
	Li vd. (2016b)	Matematiksel model, Clarke ve Wright tasarruf algoritması ve yerel arama algoritmalarının kullanıldığı iki-aşamalı bir sezgisel algoritma
	Anderluh vd. (2017)	Matematiksel model, patika yeniden bağlama ve ağgözlü rastgele uyarlanabilir arama prosedürünü içeren sezgisel bir algoritma
	Belgin (2017)	Düğüm-temelli matematiksel model, geçerli eşitsizlikler, kesme düzlemi algoritması, değişken komşu inişi ve yerel arama algoritmalarını içeren sezgisel bir yöntem
	Liu vd. (2017)	Stokastik programlama, simülasyon tabanlı tabu arama algoritması
	Wang vd. (2017)	Stokastik rota-temelli matematiksel model, genetik algoritma tabanlı çözüm yaklaşımı
	Belgin vd. (2018)	Düğüm-temelli matematiksel model, geçerli eşitsizlikler, değişken komşu inişi ve yerel arama algoritmalarını içeren sezgisel bir yöntem
	Li vd. (2018)	KTDP modeli, Clarke ve Wright tasarruf algoritması tabanlı yaklaşımı ve değişken komşu arama algoritmasını birleştiren iki-aşamalı sezgisel bir yöntem

Tablo E1'in devamı

Kategori	Çalışma	Kullanılan Çözüm Metotları
Karma	Liu vd. (2018)	KTDP modeli, geçerli eşitsizlikler, dal ve kesme algoritması, küçültme sezgiseli, bağlı bileşen sezgiseli, iki-aşamalı tabu arama sezgiseli
	Sahraeian and Esmaeili (2018)	KTDP modeli, baskın olmayan sıralama genetik algoritması II, çok amaçlı partikül sürüsü optimizasyonu
	Agardi vd. (2019)	Matematiksel model, en yakın komşu algoritması, keyfi ekleme algoritması, tepe tırmanma algoritması, genetik algoritma
	Breunig vd. (2019)	Ayrıştırma tekniği kullanan kesin bir matematiksel programlama algoritması, büyük komşu arama metasezgiseli
	Esmaeili ve Sahraeian (2019)	KTDP modeli, baskın olmayan sıralama genetik algoritması II
	He ve Li (2019)	KTDP modeli, memetik algoritma
	Jie vd. (2019)	TP modeli, sütun oluşturma ile uyarlanabilir büyük komşu arama algoritmalarını harmanlayan karma bir sezgisel yöntem
	Kancharla ve Ramadurai (2019)	KTDP modeli, uyarlanabilir büyük komşu arama sezgiseli
	Li vd. (2019)	KTDP modeli, Clarke ve Wright tasarruf algoritması ile değişken komşu arama algoritmasını bir arada kullanan karma bir sezgisel yöntem
	Su vd. (2019)	Matematiksel model, yaklaşım algoritması GA
	Enthoven vd. (2020)	KTP modeli, geçerli eşitsizlikler, uyarlanabilir büyük komşu arama sezgiseli
	Kitjacharoenchai vd. (2020)	KTP modeli, rota inşası ve büyük komşu arama algoritmaları
	Li vd. (2020a)	KTDP modeli, Clarke ve Wright tasarruf algoritması, değişken komşu arama sezgiseli
	Li vd. (2020b)	KTDP modeli, uyarlanabilir büyük komşu arama sezgiseli
	Liu vd. (2020)	Rota-temelli matematiksel model, en yakın komşu algoritması, maliyet tasarrufu algoritması, benzetilmiş tavlama algoritması, tabu arama algoritması
	Marques vd. (2020)	Rota-temelli matematiksel model, geçerli eşitsizlikler, dal-kesme-ve-fiyat algoritması, sütun oluşturma tabanlı sezgisel
	Wang ve Wen (2020)	Matematiksel model, uyarlanabilir genetik algoritma
	Wang vd. (2020)	Doğrusal programlama modeli, dinamik programlama, geliştirilmiş K-ortalımalı kümeleme algoritması, geliştirilmiş baskın olmayan sıralama genetik algoritması-II
Anderluh vd. (2021)	KTDP modeli, açgözlü rastgele uyarlanabilir arama prosedürü, büyük komşu arama, dikdörtgen bölme sezgiseli, kübik bölme sezgiseli	

**Tablo E2: ARP İçin Dğümler Arasındaki Mesafe (Metre)**

Dğümler	D	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
D	-	450.773	465.345	475.614	486.717	464.632	455.728	464.244	478.560	486.477	472.204
C1	451.903	-	12.605	28.183	39.286	20.307	13.316	33.387	29.592	55.620	30.257
C2	463.967	14.400	-	11.663	32.280	14.741	14.262	25.132	25.107	38.007	27.645
C3	478.356	28.789	11.081	-	16.394	17.288	18.954	27.893	16.781	42.713	30.406
C4	488.610	39.043	31.887	20.517	-	19.188	25.579	23.679	12.787	29.134	26.192
C5	468.355	22.996	17.016	18.502	13.427	-	13.685	14.200	13.929	27.076	16.713
C6	456.362	14.375	12.965	19.452	24.592	11.165	-	13.358	25.093	28.719	18.357
C7	466.240	24.585	24.648	28.163	23.088	13.094	12.951	-	13.921	18.925	8.563
C8	474.228	45.909	23.603	17.751	12.982	13.717	19.558	15.927	-	15.728	18.963
C9	486.811	58.728	51.572	40.202	26.594	26.022	28.017	19.024	15.397	-	13.146
C10	473.961	30.711	26.919	30.595	25.520	15.526	17.520	8.528	18.920	13.297	-

**Tablo E3: 2A-ARP İçin Dğümler Arasındaki Mesafe (Metre)**

Dğümler	D	S1	S2	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
D	-	459.812	481.277	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S1	449.094	-	60.192	17.726	32.298	42.567	53.670	31.938	22.190	34.132	45.867	49.493	39.130
S2	481.500	59.869	-	50.830	65.402	50.264	45.189	41.238	40.113	28.195	49.876	36.779	21.814
C1	-	19.364	50.420	-	12.605	28.183	39.286	20.307	13.316	33.387	29.592	55.620	30.257
C2	-	31.428	62.483	14.400	-	11.663	32.280	14.741	14.262	25.132	25.107	38.007	27.645
C3	-	45.817	49.946	28.789	11.081	-	16.394	17.288	18.954	27.893	16.781	42.713	30.406
C4	-	56.071	61.667	39.043	31.887	20.517	-	19.188	25.579	23.679	12.787	29.134	26.192
C5	-	35.131	42.792	22.996	17.016	18.502	13.427	-	13.685	14.200	13.929	27.076	16.713
C6	-	22.917	40.404	14.375	12.965	19.452	24.592	11.165	-	13.358	25.093	28.719	18.357
C7	-	34.398	28.358	24.585	24.648	28.163	23.088	13.094	12.951	-	13.921	18.925	8.563
C8	-	41.005	48.260	45.909	23.603	17.751	12.982	13.717	19.558	15.927	-	15.728	18.963
C9	-	49.463	34.824	58.728	51.572	40.202	26.594	26.022	28.017	19.024	15.397	-	13.146
C10	-	38.967	21.265	30.711	26.919	30.595	25.520	15.526	17.520	8.528	18.920	13.297	-