Tek Kamyon Çok Dronlu Ekip Lojistiği

Beste Akşit

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2022

Single Truck Multi-Drone Team Logistics

Beste Akşit

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Industrial Engineering

June 2022

Tek Kamyon Çok Dronlu Ekip Lojistiği

Beste Akşit

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Üretim ve Servis Sistemleri Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. İnci Sarıçiçek
İkinci Danışman: Öğr. Gör. Dr. Gökçe Özden Gürcan

Haziran 2022

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği danışmanlığında hazırlamış olduğum "Tek Kamyon Çok Dronlu Ekip Lojistiği" başlıklı tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 16/06/2022

Beste Akşit

İmza

ÖZET

Son yıllarda müşteri ihtiyaçlarındaki değişiklik sebebiyle Son Kilometre Lojistiği önem kazanmıştır. Bu tezde tek kamyon ve çok dronlu Kamyon Dron Ekip Lojistiği konusu ele alınmıştır. Tek kamyon çok dronlu problemlerden Uçan Yardımcılı Gezgin Satıcı Problemi için çevre ve enerji konularını göz önünde bulundurarak bir karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Modelde iki farklı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. İlk amaç fonksiyonu servis süreleri toplamının enküçüklenmesidir. Müşteriler için servis süreleri toplamının enküçüklenmesi, araçlar tarafından kat edilen mesafeyi ve bağlantılı olarak maliyeti de enküçüklemektedir. İkinci amaç fonksiyonu, gecikmeler toplamının enküçüklenmesidir. Teslimatlarda, müşterilerin belirttiği teslim zamanlarının aşılması gecikmeye neden olmaktadır. Bu gecikmelerin enküçüklenmesi müşteri memnuniyetini ve verilen hizmetin kalitesini arttırmaktadır. İki amaç fonksiyonu için sonuçlardaki ödünleşmeler analiz edilmiştir.

İlgili problem için gerçek hayat ile tutarlı bir veri seti oluşturulmuştur. Önerilen matematiksel modelde dronun enerji kısıtları ve teknik özellikleri, çevresel faktörler ve filo büyüklüğü dikkate alınmıştır. Dronların uçuş menzillerinin etkileri, enerji kısıtı doğrultusunda incelenmiştir. Müşteri ve dron sayısındaki değişim amaç fonksiyonlarının sonuçlarına etki ettiği görülmüştür. Kamyonlarla yapılan sevkiyatların azalmasıyla dronların servis sürelerinde meydana gelen artış, toplam servis sürelerinde azalmayla sonuçlanmıştır. Ayrıca yalnızca kara aracının kullanıldığı durumların, kamyon-dron ekip lojistiği ile kıyaslanması ile sunulan yöntemin çevreciliği kanıtlanmıştır. Model sonuçları kapsamında, karbon emisyonu kullanımında %80'lere varan iyileştirme gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dron, İnsansız Hava Aracı, Kamyon Dron Rotalama Problemi**,** Kamyon Dron Ekip Lojistiği**,** Son Kilometre Lojistiği**,** Uçan Yardımcılı Gezgin Satıcı Problemi

SUMMARY

Last Mile Delivery has gained priority, due to the change in customer needs in recent years. In this thesis, single truck and multi-drone Truck-Drone Team Logistics is discussed. A mixed integer mathematical model is developed for the Flying Sidekick Traveling Salesman Problem, one of the single-truck multi-drone problems, by considering the environmental and energy issues. Two different objective functions are used in the model. The first objective function is to minimize the sum of service times. Minimizing the sum of service times for customers also minimizes the distance traveled by the truck and drones, accordingly the cost. The second objective function is to minimize the sum of the delays. In deliveries, delivery after the delivery time determined by the customers is considered as a delay. Minimizing these delays increases customer satisfaction and the quality of the service provided. The tradeoffs in the results for the two objective functions are analyzed.

The data set consistent with real life has been created for the related problem. In the proposed mathematical model, the energy constraints and technical characteristics of the drones, environmental factors and fleet size are taken into account. The effects of the flight ranges of the drones are investigated in the direction of the energy constraint. The change in the number of customers and drones affects the results of the objective functions, The increase in the service times of the drones with the decrease in the shipments made by trucks resulted in a decrease in the total service times. In addition, the environmental routing of the presented method has been proven by comparing the situations where only land vehicles are used with truck-drone crew logistics. Within the scope of the model results, an improvement of up to 80% is observed in the use of carbon emissions.

Keywords: Drone, Unmanned Aerial Vehicle**,** Truck Drone Routing Problem**,** Truck Drone Team Logistics**,** Last Mile Delivery**,** Flying Sidekick Traveling Salesman Problem

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……..... v
SUMMARY……. vi
İÇİNDEKİLER……... vii
ŞEKİLLER DİZİNİ……... viii
ÇİZELGELER DİZİNİ……..... x
1. GİRİŞ VE AMAÇ……... 1
2. KAMYON-DRON EKİP LOJİSTİĞİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI……... 4
2.1. Kamyon-Dron Ekip Lojistiği Nedir?..... 4
2.2. Kamyon-Dron Rotalama Problemleri…… 10
2.2.1 Dronlu gezgin satıcı problemi……... 11
2.2.2. Dronlu araç rotalama problemi……..... 12
2.2.3. Dron teslimat problemi……..... 13
2.2.4. Dronlu taşıyıcı-araç problemi…….. 14
2.3. Literatür Araştırması…….. 15
3. MATERYAL VE YÖNTEM…….. 24
3.1 Problemin Tanımlanması…… 24
3.2 Notasyon ve Matematiksel Model……..... 26
3.2.1. Notasyon……..... 26
3.2.2. Matematiksel Model……. 28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA…….. 34
4.1 Servis Süreleri Toplamının Enküçüklenmesi Amaç Fonksiyonu İçin Sonuçlar…… 37
4.2. Toplam Gecikmelerin Enküçüklenmesi Amaç Fonksiyonu İçin Sonuçlar……..... 44
4.3. Ödünleşmeler…… 50
4.3.1. Amaç Fonksiyonları Doğrultusunda Ödünleşmeler…… 50
4.3.2. Çevreci Rotalama Açısından Ödünleşmeler…… 60
4.4. Benzetim Çalışmaları…… 63
5. SONUÇ VE ÖNERİLER……..... 68
KAYNAKLAR DİZİNİ……..... 70
EK AÇIKLAMALAR…… 76
Ek Açıklama-A: Test Problemlerine İlişkin Veriler…… 76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil		**Sayfa**
2.1.	Dron görseli……..…….....	4
2.2.	Dronlar ile teslimat……	5
2.3.	Yalnızca kamyon kullanımının oluşturduğu rota ve kamyon-dron ekibinin oluşturduğu rotanın beş düğüm için karşılaştırılması……..	9
2.4.	Dron Rotalama Problemlerinin Sınıflandırılması…….....	11
2.5.	Dronlu gezgin satıcı problemi (TSP-D) ……..	12
2.6.	Dronlu araç rotalama problemi (VRP-D) …….	13
2.7.	Dron teslimat problemi (DDP) …….	14
2.8.	Dronlu taşıyıcı-araç problemi (CVP-D) ……..	15
4.1.	Test problemlerinde verilen düğümlerin harita görüntüsü……	34
4.2.	Ayperin Eczanesi ve Okyanus Eczanesi arasında kamyon ve dron uzaklıklarının karşılaştırılması…….....	36
4.3.	Aybek Eczanesi ve Güneş Ecza Deposu arasında kamyon ve dron uzaklıklarının karşılaştırılması…….....	36
4.4.	3. test probleminin en küçük toplam servis süresi amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası…….....	39
4.5.	20. test probleminin servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası……..	41
4.6.	32 test probleminin servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası……..	43
4.7.	3. test probleminin en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası…….....	45
4.8.	20. test probleminin en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası…….....	47
4.9.	32. test probleminin en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası…….....	49
4.10.	4 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara ve hava aracı için servis süreleri……	51

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil		Sayfa
4.11.	4 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara ve hava aracı için gecikmeler……..	52
4.12.	5 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara ve hava aracı için servis süreleri……	53
4.13.	5 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara ve hava aracı için gecikmeler……..	54
4.14.	6 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara ve hava aracı için servis süreleri……	55
4.15.	6 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara ve hava aracı için gecikmeler……..	56
4.16.	Müşteri sayılarına bağlı olarak ödünleşme grafiği……	60
4.17.	Servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre sadece kamyon ile yapılan sevkiyatların kamyon-dron ekip lojistiği ile kıyaslanması……	61
4.18.	En küçük toplam gecikme amaç fonksiyonuna göre yalnızca kara aracı ile yapılan sevkiyatların kamyon-dron ekip lojistiği ile kıyaslanması….....	62
4.19.	Benzetim modeli girdi ve çıktıları……	63
4.20.	Benzetim ortamındaki görev planı ekranı…….....	64
4.21.	Benzetim ekran görüntüsü…….....	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge		Sayfa
2.1.	Kamyon ve dron karşılaştırması……	6
2.2.	Tek Kamyon-Tek Dron Rotalama Problemleri Literatür Çalışmaları……..	16
2.3.	Tek Kamyon-Çok Dron Rotalama Problemleri Literatür Çalışmaları……..	18
2.4.	Çok Kamyon-Çok Dron Rotalama Problemleri Literatür Çalışmaları.....	21
2.5.	Dron Rotalama Problemleri Literatür Çalışmaları……	23
3.1.	Enerji formülasyonuna ait simge ve birimler……..……...	32
4.1.	Düğümlerin kara aracına göre seyahat süresi matrisi……...	35
4.2.	Düğümlerin hava aracına göre seyahat süresi matrisi……...	35
4.3.	4 müşterili test problemlerinde en küçük toplam servis süresi amaç fonksiyonu için sonuçlar……..	38
4.4.	5 müşterili test problemlerinde servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonu için sonuçlar……..	40
4.5.	6 müşterili test problemlerinde en küçük toplam servis süresi amaç fonksiyonu için sonuçlar……..	42
4.6.	4 müşterili test problemlerinde en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonu için sonuçlar…….	44
4.7.	5 müşterili test problemlerinde en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonu için sonuçlar…….	46
4.8.	6 müşterili test problemlerinde en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonu için sonuçlar…….	48
4.9.	Test problemlerinin ödünleşme değerleri çizelgesi……...	57
4.10.	Sadece kamyon kullanılarak yapılan teslimatlar için çözüm çizelgesi…….	61
4.11.	Matematiksel model ve benzetim modeli sonuçları……..	66

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Artan rekabet koşulları ve özellikle e-ticaretin geldiği son noktada son kilometre lojistiği önem kazanmıştır. Son kilometre lojistiği, tedarik zinciri yönetiminin karmaşık ve maliyetli bir bölümünü oluşturmaktadır. Goodman'a göre (2005), yüklerin dağıtım merkezlerinden müşterilere nihai teslimi, toplam nakliye maliyetinin %28'ini oluşturmaktadır. Benzer şekilde, Jacobs vd. (2019), son kilometre lojistiğinin, toplam tedarik zinciri maliyetinin yaklaşık %41'ini oluşturduğunu belirtmiştir.

E-ticaretin önemi ve rekabetin artmasıyla birlikte müşterilere daha esnek ve hızlı şekilde cevap verebilmek ve müşteri memnuniyetini, hizmet kalitesini arttırmak ihtiyaç haline gelmiştir. Yaşadığımız günlerde, özellikle salgınla birlikte, hızlı ve sık teslimat talepleri şirketleri kaçınılmaz olarak son kilometre lojistiğine yöneltmiştir. Perakendecilerin son adım lojistiğine yaptıkları yatırımlar giderek artmaktadır.

Operasyonel düzeyde, son kilometre lojistiğinde rotalama zor bir problemdir. Özellikle kentsel alanlarda, çok sayıda ve farklı alanlarda müşteriye en verimli şekilde teslimat rotalarının planlanması, oldukça karmaşık ve hesaplama açısından yoğun bir problemi oluşturmaktadır (Moshref-Javadi et al., 2020).

Küresel kentleşmenin mevcut hızı göz önüne alındığında, dünyanın dört bir yanındaki şehirlerde trafik yükleri ve tıkanıklık seviyeleri artarken, e-ticaret ve müşteri odaklı teslimat hizmetlerinin gelişmesi, her zamankinden daha hızlı, verimli ve güvenilir kentsel taşımacılığı gerektirmektedir (Moshref-Javadi et al., 2020). Kentsel alanlar ve dağıtım sistemleri genel olarak geleneksel lojistik üzerine kurulmuştur. Ancak bu gelişmeler, geleneksel lojistiğin günümüzde yeterli olamayacağını göstermektedir. Geleneksel lojistiğin yetersiz kalması sonucu alternatif taşıma yöntemleri arayışı başlamıştır. Bu arayış insansız hava araçlarının (İHA) geleneksel araçlarla entegrasyonu fikrini doğurmuştur. Amazon, UPS, DHL, Google, FedEx gibi şirketler teslimatlarda dronların kullanımını başlatmıştır.

Teslimatlarda İHA'ların kullanımı fikrinin doğması ile birlikte insansız hava araçları alanında önemli gelişmeler başlamıştır. Kaçınılmaz olarak bu uygulama rotalama problemleri içerisine girmiştir ve kamyon-dron ekip lojistiği uygulaması geliştirilmiştir. Hem dron, hem de kamyon-dron ekip lojistiği, günümüzde halihazırda uygulanmakla birlikte, önümüzdeki yıllarda bu uygulamaların daha da önem kazanacağı ve tamamen hayatımıza entegre olacağı bilinmektedir.

Kamyon-dron lojıstiği alanında açık ara en yaygın araştırma son kilometre lojistiğidir. Bu hibrit uygulama, kamyon ve dronların avantajlarını birleştirerek son kilometre lojistiğinde verimi arttırmakta, maliyetleri düşürmektedir. Kamyonlar yük kapasiteleri ve uzun mesafede yolculuk yapabilmeleri ile geleneksel lojistikte avantajlı konumda olmuşlardır. Dronlar ise statik yol kümesine ihtiyaç duymamaktadır, esnek şekilde üç boyutlu hareket kabiliyetine sahiptirler. Ayrıca kamyonlara göre hem daha sabit hem de daha yüksek bir hızla yol alabilmektedirler. Bu özellikleri ile kamyon ile ziyaret edilmesi zor alanlardaki müşterilere kolaylıkla hizmet verebilmekte, özellikle dar yollarda, uzak mesafelerde, iniş ve çıkışlı bölgelerde iyi iş çıkarmaktadırlar. Önde gelen bir ABD dağıtım şirketi, son adım lojistiğinde dronların yer alması durumunda yıllık yaklaşık 50 milyon dolarlık bir maliyet tasarrufu tahmin etmektedir (Rash, 2017).

Kamyon-dron lojistiğindeki literatür çalışmaları incelendiğinde, en genel anlamda amaç fonksiyonlarında tamamlanma zamanının enküçüklenmesine odaklanıldığı görülmektedir. Çalışmalarda çoğunlukla karma tamsayılı matematiksel model ve beraberinde bir sezgisel algoritma kullanılmıştır. Tek kamyon-tek dron sınıfındaki çalışmalarda Murray ve Chu (2015), tamamlanma süresinin enküçüklenmesi için en uygun rotanın oluşturulmasında hem kamyon ve dronun senkronize çalıştığı FSTSP (Flying Sidekick Traveling Salesman Problem) hem de paralel kamyon ve dron planlaması olan PDSTSP (Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem) problem tipine yönelik algoritma sunmuşlardır. Wang vd. (2019), çalışmalarında maliyet ve tamamlanma zamanı olmak üzere iki amaç fonksiyonu arasında uzlaşmaya varmayı amaçlamışlardır. Çalışma bu kapsamda yapılan ilk çalışma olmuştur. Çözüme yönelik genetik algoritma tabanlı bir meta-sezgisel algoritma kullanılmıştır. Tek kamyon-çok dronlu çalışmalarda Javadi vd. (2020), kamyon ve dronların senkronize hareket ettiği problemler üzerine çalışmışlar ve kamyon-dron rotalama algoritması (TDRA-Truck Drone Routing Algorithm) ismini

verdikleri bir meta-sezgisel çözüm yöntemi kullanmışlardır. El-Adle vd. (2019), problemin çözümü için dal-sınır algoritması önermiştir. Çok kamyon-çok dron sınıfındaki çalışmalarda Han vd. (2020), arazi şekillerinin sebep olduğu teslimat uygunsuzluklarına çözüm olarak; kamyonların, dronlar ve yükler için taşıma aracı olarak görev aldığı, dronların ise müşteri teslimatlarında görevlendirildiği problemler üzerine çalışmışlardır. Liv d. (2022), kamyon ve dronların yaylar üzerinde hareketlerinin senkronize edildiği bir çalışma sunmuşlardır.

Literatürde hem firmalar hem de müşteriler açısından çevre ve enerji konularında çalışma ihtiyacı gözlemlenmiştir. Bu motivasyon ile belirlenen ihtiyaçlara karşılık verecek kamyon ve dronların görev planlamasına yönelik karma tamsayılı bir model geliştirilmiştir. Matematiksel modelde Moshref-Javadi vd.'nin (2019), tek kamyon çok dron ekip lojistiği üzerine yaptıkları çalışma temel alınmıştır. Modele insansız hava araçlarının enerji kısıtlamaları dahil edilmiştir. Problemin çözümünde dronların filo büyüklükleri, yük ve enerji kapasiteleri ve çevresel koşullar göz önüne alınmıştır. Modelde müşteriler tarafından belirlenen teslim zamanları da dikkate alınmaktadır. Literatürden farklı olarak, modele iki farklı amaç fonksiyonu dahil edilmiştir. Bunlar;servis süreleri toplamının enküçüklenmesi (her bir müşteri için servis süreleri toplamı) ve toplam gecikmenin enküçüklenmesidir. İki farklı amaç fonksiyonu verildiğinden, bulunan çözümler hem lojistik firmaları için toplam servis süresine bağlı rotanın tamamlanma zamanı ile maliyet açısından; hem de gecikmelerin enküçüklenmesi ile müşteri memnuniyeti açısından değerlendirilmeye açıktır. Tez kapsamında iki amaç fonksiyonu sonuçları arasındaki ödünleşme de araştırılmıştır.

Tez çalışmasının giriş bölümünden sonra ikinci bölümde kamyon-dron ekip lojistiği ve literatür çalışmaları yer almaktadır. Üçüncü bölüm olan materyal ve yöntem bölümünde, tek kamyon-çok dron görev planlaması probleminin tanıtımı ve karar modeli verilmiştir. Dördüncü bölümde bulgular ve tartışma ile modelin sonuçlarına yer verilmiştir. Beşinci bölümde verilen sonuç ve öneriler ile çalışma tamamlanmıştır.

2. KAMYON-DRON EKİP LOJİSTİĞİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Kamyon-Dron Ekip Lojistiği Nedir?

Globalleşmenin bir sonucu olarak dünyanın her yerinde şehirlerde trafik yoğunluğu artmıştır ve rekabetin geldiği noktada hızlı, güvenli ve kaliteli hizmet önem kazanmıştır. Araştırmalar geleneksel lojistiğin yetersiz kaldığını göstermektedir. Çözüm olarak alternatif taşıma yöntemleri denenmiş ve dron kullanımı ve geleneksel araçlarla entegrasyonu üzerine çalışmalar başlatılmıştır.

Dron, bir insan pilotunun yardımı olmadan uçabilen bir makinedir (Şekil 2.1). Makine öğrenmesinin yükselişi de dahil olmak üzere en son bilgi teknolojisindeki gelişmelerle desteklenen kapasitesi ve potansiyeli nedeniyle oldukça popüler hale gelmiştir (Chung vd., 2020).

İnsansız Hava Aracı-İHA (Unmanned Aerial Vehichle-UAV) olarak da literatürde yer alan bu araçlar için çalışmada dron ifadesi kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Dron görseli

Dronların kullanımı ilk başlarda askeri alanlarda yaygınlaşmıştır. Sonrasında tarım, sağlık, inşaat, fotoğrafçılık, izleme-gözetleme alanlarında popülerliğini arttırmıştır. Günümüzde de dronların teslimatlarda kullanımı başlamış ve bu alandaki çalışmalar giderek hızlanmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Dronlar ile teslimat

Amazon CEO'su Jeff Bezos, teslimatlarında dronların kullanımına başladıklarını duyurmuştur. Depolarından müşterilere kargoları dronlarla teslim etmeye başlamışlardır. Dron, depodan ayrılmakta ve konumlandırma sistemi aracılığıyla yönlendirildiği müşteri konumuna gitmektedir. Paket, müşterinin ön kapısının yanına bırakılmakta ve dron depoya geri dönmektedir. Tüm bunlar insan müdahalesi veya rehberliği olmadan gerçekleşmektedir. Daha sonra DHL, UPS, Google, FedEx gibi birçok şirket de sevkiyatlarında dron kullanımlarını başlattıklarını duyurmuştur.

Geleneksel taşıma aracı kamyon ve insansız hava araçlarının avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Aşağıda Çizelge 2.1'de kamyon ve dronların özelliklerine göre karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kamyon ve dron karşılaştırması

	Kamyon	Dron
Teslimat Hızı	Düşük	Yüksek
Çevresel Etki	Olumsuz	Olumlu
Taşıma Mesafesi	Sınırsız	Sınırlı
Taşıma Kapasitesi	Yüksek	Düşük
Enerji Yönetimi	Olumlu	Olumsuz
Kentsel Alanlar	Olumsuz	Olumlu
Hareket Kabiliyeti	Düşük	Yüksek

Çizelge 2.1'de gösterildiği gibi kamyon ve dronun birbirlerine kıyasla avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Taşıma kapasitesi açısından kamyon drona göre daha avantajlıyken hız açısından dronlarla, kamyonlara göre daha çabuk teslimat sağlanmaktadır. İzleyen kısımda, çizelgedeki her bir kriter ayrıntılandırılmıştır.

Teslimat Hızı

Müşteri memnuniyeti ve hizmet kalitesinin öneminin artması ile birlikte hızlı, esnek, dinamik bir teslimat süreci de giderek önem kazanmaktadır. Dronların kullanımıyla teslimat süresi azalmaktadır. Dronlar düşük maliyetlerle teslimatları hızlandırma avantajına sahiptir. Rekabetin giderek yükseldiği günümüz dünyasında teslimat hızlarının arttırılması, hem müşteri memnuniyeti hem de maliyet açısından oldukça değerlidir.

Çevresel Etki

Dronların son kilometre lojistiğine entegrasyonu, çevre üzerinde geleneksel motor yakıtlı araçlarda gözlemlenenden daha az olumsuz etkiye sahiptir. İnsansız hava araçları karbon emisyonu üretmemektedir, daha az gürültülüdür ve trafik sıkışıklığı olan bölgelerde avantajlıdır. Yeşil lojistik üzerine yapılan çalışmalarda, dronların çevreye olumlu etkileri gözlemlenmiştir.

Taşıma Mesafesi

Dronların en büyük dezavantajlarından biri uçuş mesafelerinin kısıtlı olmasıdır. Bunun sebebi şarj veya pil teknolojilerinin sınırlı olmasıdır. Kamyonlar taşıma mesafesi açısından oldukça avantajlıdır. Coğrafi erişim kapasiteleri oldukça yüksektir. Uzun yol gerektiren teslimatlarda tercih edilmektedir. Dronlar ise taşıma esnasında şarj noktalarına veya kamyonlara ihtiyaç duymaktadır.

Taşıma Kapasitesi

Dronların yük taşıma kapasiteleri kamyonlara göre sınırlıdır. Yüklerin fiziksel özellikleri dron açısından kısıtlama oluşturmaktadır. Geleneksel teslimat araçları genellikle yolculuk başına 120 adet paket taşıyabilirken, insansız hava araçları fiziksel yük taşıma kapasiteleri nedeniyle gönderi başına yaklaşık 1 paket taşıyabilmektedir.

Enerji Yönetimi

Teslimatların güvenli ve verimli gerçekleşebilmesi için enerji yönetimi konusu kritiktir. Enerji kapasiteleri, geleneksel taşıma şekillerine göre daha kısıtlıdır. Ayrıca dronlar için enerji kesintileri, teslimatlarda çeşitli problemlere yol açabilmektedir.

Kentsel Alanlar

Küreselleşmenin sonucu olarak e-ticaret ve müşteri odaklı teslimat hizmetleri hızla büyümektedir ve gerçekleştirilen teslimatların sayısı giderek artmaktadır. Tüm dünyada yollardaki tıkanıklık seviyesinin ve trafik yoğunluğunun artması ise teslimat hızını ve kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Dronların esnek hareket kabiliyetleri, trafiğin sıkışık olduğu kentsel alanlarda kamyona göre oldukça avantaj kazandırmaktadır.

Hareket Kabiliyeti

İnsansız hava araçlarının kamyonlara göre en bariz avantajları statik bir yol kümesine ihtiyaç duymamalarıdır. Dronlar, üç boyutlu, esnek hareket kabiliyetine sahiptir (Javadi, 2017). Bu durum teslimatlara özellikle daha zorlu bölgelerde hız sağlamaktadır.

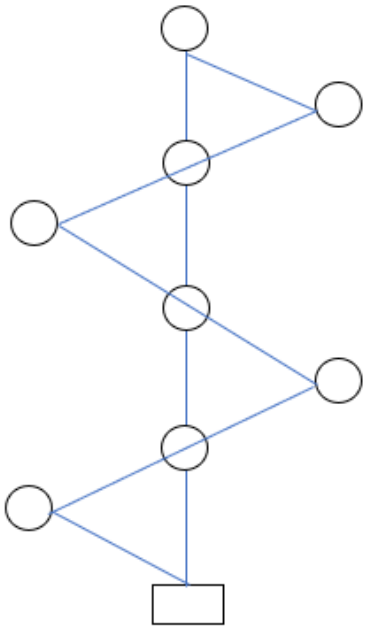
Güvenlik

Dronlar uçuş politikaları gereği farklı bölgelerde farklı kısıtlamalara sebep olabilmektedir. Dronların uçuşunun yasak olduğu alanlar bulunmaktadır. Güvenlik gereği dronların maksimum yük kapasiteleri ve uçuş yükseklikleri değişken özellik göstermektedir. Ayrıca hava kararıktan sonra teslimat yapamamaktadır.

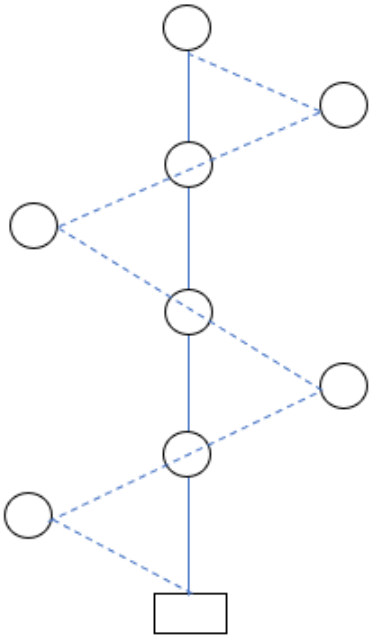
Kamyon ve dronların farklı durumlarda avantaj ve dezavantajları gözlenmektedir. Her ikisinin de avantajlarından yararlanabilmek ve etkin ve verimli taşıma sağlayabilmek için kamyon-dron ekip lojistiği fikri ortaya çıkmıştır.

Lojistikte geleneksel olarak kamyon kullanımının oluşturduğu rota, kamyon-dron ekibinin oluşturduğu rota Şekil 2.3'de örneklenmiştir.





a. Geleneksel kamyon rotası



b. Alternatif kamyon-dron ekip lojistiği rotası

Şekil 2.3. Yalnızca kamyon kullanımının oluşturduğu rota ve kamyon-dron ekibinin oluşturduğu rotanın karşılaştırılması

Şekil 2.3'de tek depo ve 8 müşterinin bulunduğu 9 düğümlü bir örnek sunulmuştur. Gidilen mesafeler 1'er birim olarak ele alınmıştır. Verilen örnek için öncelikle yalnızca kamyonun kullanıldığı durumda oluşacak rota incelenmiştir. Kamyon öncelikle tüm müşterilere teslimat yapmakta, sonrasında depoya geri dönmektedir. Aldığı mesafe 12 birim yoldur. Alternatif olarak oluşturulan kamyon-dron ekip lojistiği rotasında 4 müşteriye dron gönderimi yapılmıştır. Kamyon ise 4 müşteriye hizmet vermiş ve depoya geri dönmüştür. Alternatif durumda yaptığı rotada 8 birim yol almıştır. İki durum kıyaslandığında kamyon rotasındaki 4 birimlik azalma görülmektedir. Bu durum kamyon-dron ekip lojistiğinin %66 fosil yakıt tasarrufu sağladığını göstermektedir. Lojistik alanında dronların kullanımı, çevre açısından olumlu değerlendirilmektedir.

2.2. Kamyon-Dron Rotalama Problemleri

Macrina vd. (2020), dron rotalama problemlerini dört sınıfa ayırmıştır (Şekil 2.4):

1) Dronlu gezgin satıcı problemi (TSP-D - Traveling salesman problem with drones),

a) Uçan yardımcılı TSP (FSTSP - Flying sidekick traveling salesman problem)

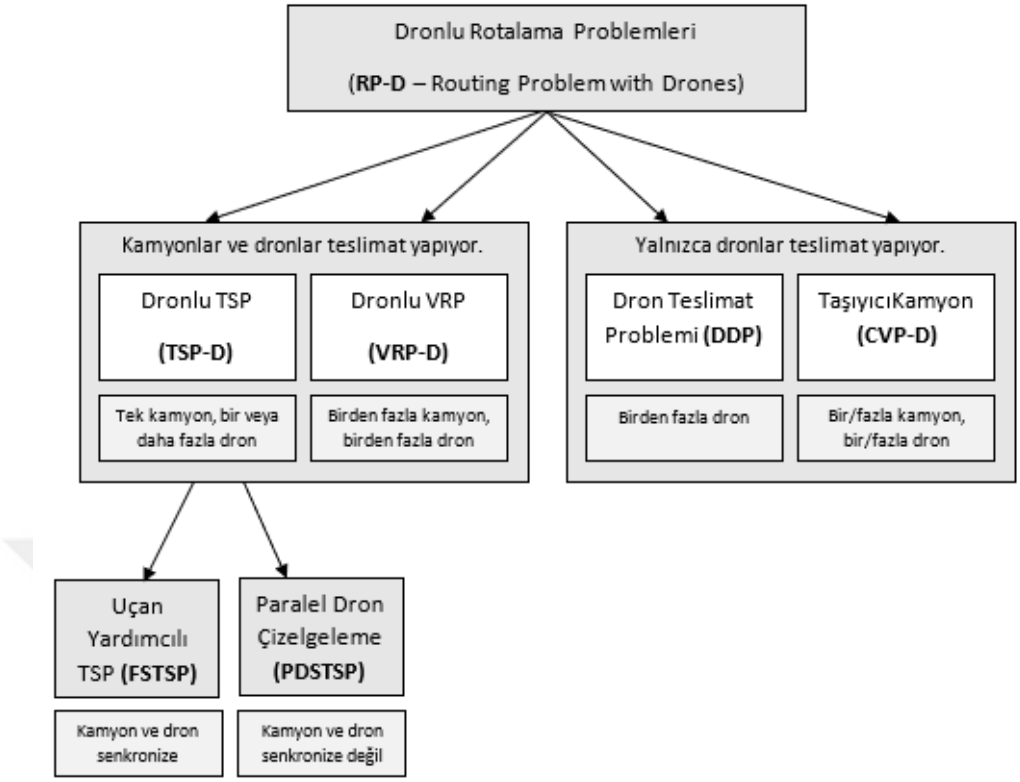
b) Paralel dron çizelgeleme (PDSTSP - Parallel drone scheduling traveling salesman problem)

2) Dronlu araç rotalama problemi (VRP-D – Vehicle routing problem with drones),

3) Dron teslimat problemi (DDP – Drones delivery problem),

4) Dronlu taşıyıcı-araç problemi (CVP-D - Carrier-vehicle problem with drones)

Bu dört grup iki ana sınıfta incelenmiştir. İlk sınıftaki problemler teslimatların kamyon ve dronlar ile gerçekleştirildiği problemlerdir. İkinci sınıftaki problemler teslimatların yalnızca dronlar ile gerçekleştirildiği problemlerdir.



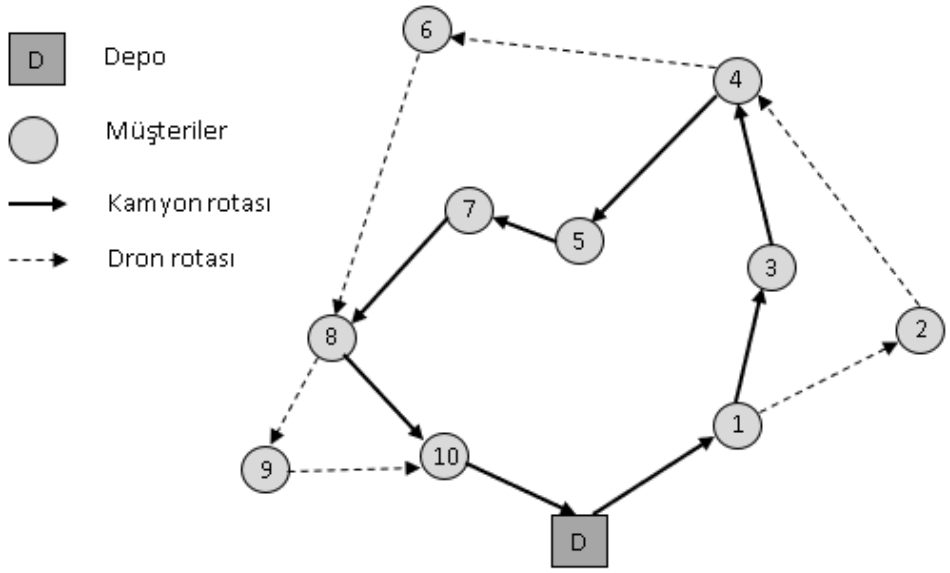
Şekil 2.4. Dron Rotalama Problemlerinin Sınıflandırılması

Şekil 2.4'te verilen sınıflandırmaya göre, TSP-D ve VRP-D sevkiyatların kamyon ve dronlar tarafından yapıldığı problem grubunda iken, DDP ve CVP-D, sevkiyatların yalnızca dronlar tarafından yapıldığı rotalama problemleridir. Teslimatlarda kullanılan kamyon ve dron sayılarına ve aralarındaki senkronizasyona göre problemler, uçan yardımcılı TSP (FSTSP) ve paralel dron çizelgeleme (PDSTSP) problemleri olarak sınıflandırılmaktadır.

2.2.1. Dronlu gezgin satıcı problemi

Dronlu gezgin satıcı problemi (TSP-D), sevkiyatların hem kamyon hem dronlar tarafından yapıldığı problem türüdür. Problemde tek kamyon ve bir veya birden fazla dron görev almaktadır. Bu problem tipi iki ayrılmaktadır. Kamyon ve dronun (ya da dronların) senkronize olduğu problem tipi uçan yardımcılı TSP (FSTSP) olarak, kamyon ve dronun (ya da dronların) senkronize olmadığı problem tipi ise Paralel Dron Çizelgeleme

(PDSTSP) problemi olarak adlandırılmaktadır. Dronlu Gezgin Satıcı Probleminin aşağıda Şekil 2.5.'te gösterimi verilmiştir.

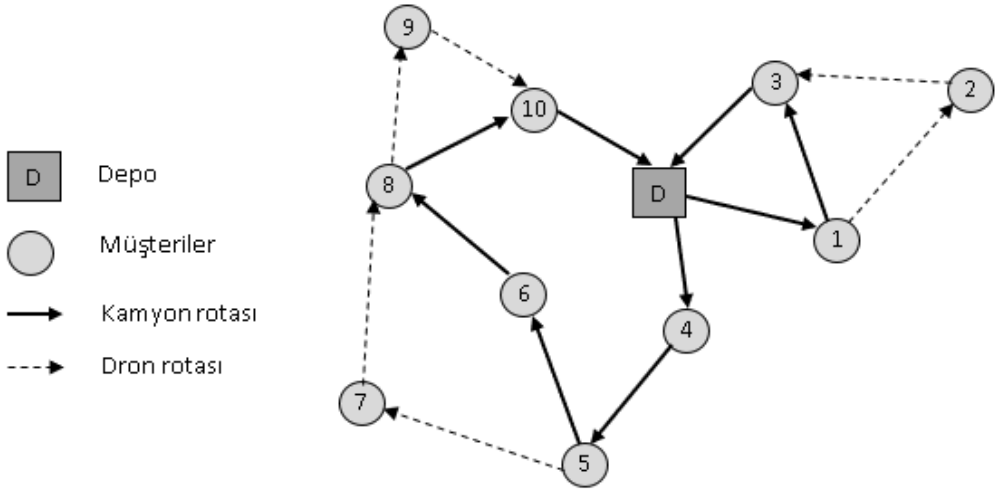


Şekil 2.5. Dronlu gezgin satıcı problemi (TSP-D)

Şekil 2.5'te dronlu gezgin satıcı problemine ait rotada görüldüğü gibi sevkiyatlar hem kamyon hem de dron tarafından yapılmaktadır. Böylece kamyon müşterilere hizmet sağlarken aynı zamanda dron (ya da dronlar) için merkez ve dağıtıcı görevi görmektedir. Şekilde kamyonun rotasının önemli ölçüde kısaldığı görülmektedir. Kamyon-dron ekip lojistiği ile hem müşteriye olan teslimatların daha kısa sürede yapılması sağlanmıştır hem de fosil yakıt kullanan kamyonun rotasındaki kısalma ile daha çevreci bir rotalama söz konusu olmuştur.

2.2.2. Dronlu araç rotalama problemi

Dronlu araç rotalama probleminde (VRP-D), sevkiyatlar hem kamyonlar hem dronlar tarafından yapılmaktadır. Problemde birden fazla kamyon ve birden fazla dron görev almaktadır. Dronlu araç rotalama probleminin gösterimi Şekil 2.6'da verilmiştir.

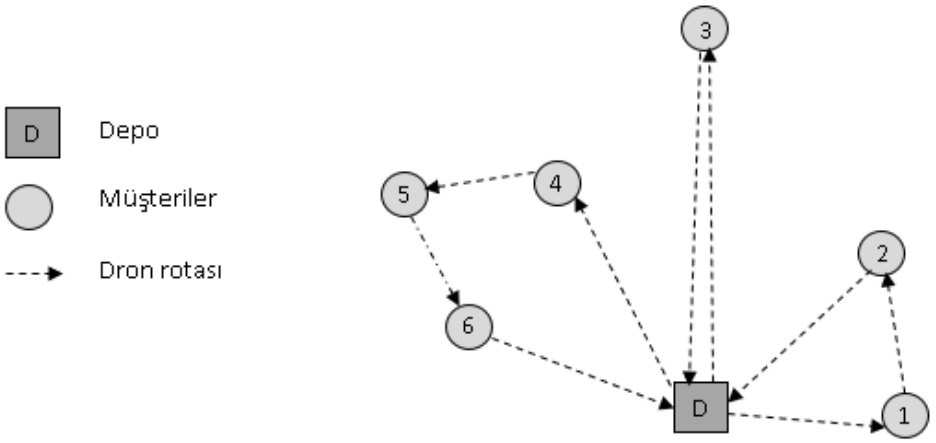


Şekil 2.6. Dronlu araç rotalama problemi (VRP-D)

Şekil 2.6'da dronlu araç rotalama problemindeki rotada gösterildiği gibi birden fazla kamyon bulunmaktadır. Bu durumda birden fazla temel rota oluşmakta ve dronlar aynı dronlu gezgin satıcı problemindeki gibi kamyonla birlikte hareket etmekte ve taşındıkları kamyonun üzerinden fırlatılmaktadır. Kamyon sayısının birden fazla olması rotayı kısaltmakta ve dolayısıyla teslimatları hızlandırmaktadır.

2.2.3. Dron teslimat problemi

Dron teslimat problemlerinde (DDP), sevkiyatlar dronlar tarafından yapılmaktadır. Problemde birden fazla dron görev almaktadır (Şekil 2.7).

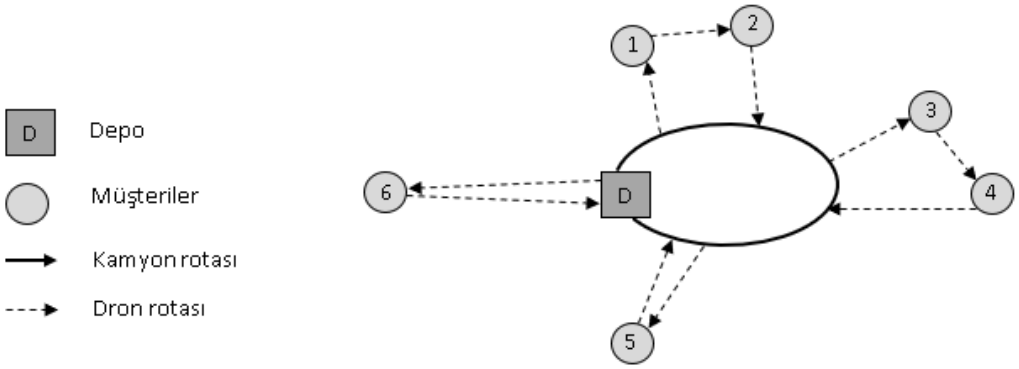


Şekil 2.7. Dron teslimat problemi (DDP)

Şekil 2.7'de gösterilen dron teslimat problemi rotasında birden fazla dron sevkiyatların gerçekleştirilmesinde rol almaktadır. Dronlar depodan fırlatılmaktadır.

2.2.4. Dronlu taşıyıcı-araç problemi

Dronlu taşıyıcı araç probleminde (CVP-D), sevkiyatlar dronlar tarafından yapılmaktadır. Problemde bir veya birden fazla kamyon ve bir veya birden fazla dron görev almaktadır. TSP-D, VRP-D ve DDP'nin bir kombinasyonudur. Tamamlayıcı yeteneklere sahip işbirliği yapan araçlardan oluşan kamyon-dron ekibi teslimatgerçekleştirmektedir. Taşıyıcı araçların görevi dronların ve paketlerin taşımasını sağlamaktır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Dronlu taşıyıcı-araç problemi (CVP-D)

Şekil 2.8'de dronlu taşıyıcı araç probleminin rotasında temel bir araç rotası ve sevkiyatları gerçekleştirilen dronların rotası gösterilmiştir.

Macrina vd. (2020) tarafından yapılan sınıflandırmaya ek olarak kamyon-dron ekip rotalama problemleri,

- Tek kamyon-tek dron,
- Tek kamyon-çok dron,
- Çok kamyon-çok dron olarak da sınıflandırılabilir. (Özden ve Sarıçiçek, 2021)

Ayrıca ekip lojistiğinden farklı olarak sadece dron rotalama problemleri literatürde yer almaktadır.

2.3. Literatür Araştırması

Kamyon-dron ekip rotalama problemlerine ait literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Teslimatlarda tek kamyon ve tek dronun görev aldığı rotalama problemlerine ait literatürdeki çalışmalar Çizelge 2.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2. Tek Kamyon-Tek Dron Rotalama Problemleri Literatür Çalışmaları

Yazarlar	**Yayın Yılı**	**Problem Türü**	**Amaç Fonksiyonu**	**Çözüm Yöntemi**
Zhang vd.	2021	FSTSP	Karın enbüyüklenmesi	Karma Tamsayılı Model ve Sezgisel
Liu vd.	2021	FSTSP	Maliyetin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Meta-sezgisel
Baik ve Valenzuela	2020	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Gonzalez-R vd.	2020	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Rich	2020	PDSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Meta-sezgisel
Schermer vd.	2020	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, sezgisel
Wang vd.	2019	FSTSP	Maliyetin ve tamamlama zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Meta-sezgisel
Poikonen vd.	2019	FSTSP	Operasyon maliyetlerinin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, sezgisel
Dukkancı and Kara	2019	CVP-D	Maliyetin enküçüklenmesi	Matematiksel Model ve Sezgisel
Freitas	2018	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, sezgisel
Li vd.,	2018	PDSTSP	Operasyon maliyetlerinin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, sezgisel
Bouman vd.	2018	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Kesin çözüm veren yöntem
Agatz vd.	2018	FSTSP	Operasyon maliyetlerinin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, sezgisel
Yurek ve Ozmutlu	2018	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel

Çizelge 2.2. Tek Kamyon-Tek Dron Rotalama Problemleri Literatür Çalışmaları (devam)

Yazarlar	Yayın Yılı	Problem Türü	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Yöntemi
Ha vd.	2018 b	FSTSP	Rotalama maliyeti ve dron bekleme maliyetinin enküçüklenmesi	Matematiksel model, metasezgisel ve sezgisel
Ha vd.	2018a	FSTSP	Operasyonel maliyetlerin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, sezgisel
Carlsson ve Song	2017	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Sezgisel
Marinelli vd.	2017	FSTSP	Operasyon maliyetlerinin enküçüklenmesi	Matematiksel Model ve Meta-sezgisel
Luo vd.	2017	FSTSP	Dron rotalama süresinin enküçüklenmesi	Matematiksel Model ve Sezgisel
Murray ve Chu	2015	FSTSP & PDSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel

Murray ve Chu (2015), çalışmalarında hem kamyon ve dronun senkronize çalıştığı FSTSP'ye hem de paralel görev aldıkları PDSTSP'ye yönelik çözüm önerileri sunmuşlardır. Amaçları tamamlanma zamanının enküçüklenmesidir.

Yürek ve Özmutlu (2018), çalışmalarında lojistik firmalarındaki verimliliğin arttırılmasını ve teslimat sürelerinin kısaltılmasını amaçlamışlardır. Teslimat sürelerinin en aza indirilmesi için önerdikleri çözüm yönteminin ilk aşamasında, kamyon rotası ve drona atanan müşteriler belirlenmektedir. İkinci aşamada, ilk aşamada verilen rotalama ve atama kararlarını sabitleyerek dron rotasını optimize etmek için bir Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama modeli sunulmuştur. En kısa kamyon rotasından başlayarak atama ve rota kararları iyileştirilmektedir.

Zhang vd. (2021), insani yardım kuruluşlarının afet sonrası ulaşım ağının etkilerini arttırabilmek amacıyla dron kullanımını önermişlerdir. Problemde kamyon ve kamyondan

fırlatılan kamera ile donatılmış bir dron bulunmaktadır. Kamyon dronun bataryasının ve pilinin yenilenmesi için görev almıştır. Çözüme yönelik Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama Modeli ile birlikte bir algoritma önerilmiştir. Böylece afet sonrası hem bilgi toplama hem de yol durumunun koşullarından dolayı yardım taşınmasının sağlanması açısından kullanılabilir bir çözüm önerisi literatüre sunulmuştur.

Liu vd. (2021), Yasaklı Arama ile entegre edilen bir Tavlama Benzetimi sezgiseli sunmuştur. Çalışmada yük oranları, dronların maksimum taşıma kapasiteleri ve dronların bataryaları olmak üzere üç faktör göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçlar, teslimat için daha hafif paketler olduğunda dron kullanımının maliyetten tasarruf sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, dronun taşıma kapasitesi ve pil gücünün kapasitelerini büyütmek için teknolojilerin uygun şekilde geliştirilmesinin daha fazla maliyetten tasarruf sağlayacağı vurgulanmıştır. Çin'in Changsha kenti için serim tabanlı bir çalışma sunulmuştur. Teslimatlarda tek kamyon ve birden fazla dronun görev aldığı rotalama problemlerine ait literatürdeki çalışmalar Çizelge2.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Tek Kamyon-Çok Dron Rotalama Problemleri Literatür Çalışmaları

Yazarlar	**Yayın Yılı**	**Problem Türü**	**Amaç Fonksiyonu**	**Çözüm Yöntemi**
Gomez-Lagos vd.,	2021	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Choi ve Schonfeld	2021	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Formülasyon
Poikonen ve Golden	2020	CVP-D	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Salama ve Srinivas	2020	FSTSP	Maliyetin ve tamamlama zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel

Çizelge 2.3. Tek Kamyon-Çok Dron Rotalama Problemleri Literatür Çalışmaları (devam)

Yazarlar	**Yayın Yılı**	**Problem Türü**	**Amaç Fonksiyonu**	**Çözüm Yöntemi**
Dell' Amico vd.	2020	PDSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Moshref-Javadi vd.	2020	FSTSP	Müşteriye varış zamanlarının en küçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Meta-sezgisel
Lin vd.	2020	CVP-D	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Moshref-Javadi vd.	2020	FSTSP	Müşteriye varış zamanlarının en küçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Meta-sezgisel
Kim ve Moon	2019	PDSTSP	Teslimat süresinin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Meta-sezgisel
Jeong vd.,	2019	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Meta-sezgisel
Karak ve Abdelghany	2019	CVP-D	Maliyetin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
El-Adle	2019	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Chang ve Lee	2018	FSTSP	Teslimat süresinin enküçüklenmesi	Kesin çözüm veren yöntem, Sezgisel
Boysen	2018	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model
Phan vd.	2018	FSTSP	Rotalama maliyetlerinin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Wang vd.	2015	FSTSP	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Kötü durum teoremleri

Choi ve Schonfeld, 2021 yılında yayınlanan çalışmalarında toplam maliyeti minimize etmeyi amaçlamışlardır. Bunun için dört farklı alternatif durumu incelemişlerdir: (1) geleneksel kamyon ile teslimat, (2) kamyon ve dron ile teslimat, (3) dron ile birebir teslimat ve (4) dron ile birden fazla teslimat. Yazarlar, dronların yükleme kapasitelerinin sınırlı olması sebebi ile ortalama tur uzunluğunu tahmin eden mesafe yaklaşımı yöntemini kullanmışlardır. Talep yoğunluğu, müşterilerin bekleme süreleri, dron hızı, hizmet alanı boyutu, dron boyutu ve dağıtım merkezinin konumuna göre analizler yapılmaktadır. Çalışmalarının sonuçları, paket teslimatları için dronların kullanılmasının, geleneksel kamyonların kullanılmasına kıyasla maliyet açısından daha olumlu olduğunu göstermiştir.

Phan ve arkadaşları (2018), birden fazla insansız hava aracına sahip TSP adı verilen bir TSP-D türünü ele almış ve Ha ve arkadaşlarının GRASP metodunun uyarlanmış bir versiyonunu önermiştir. Birden fazla drona sahip TSP için Uyarlanabilir bir Büyük Komşuluk Araması (Adaptive Large Neighbourhood Search-ALNS) sezgiseli kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların ALNS'nin genişletilmiş GRASP'dan daha etkili olduğu gösterilmiştir.

Poikonen ve Golden (2020), tek bir kamyon ve k sayıda dronun (kMVDRP) dikkate alındığı çok ziyaretli bir dron rotalama problemi (MVDRP- multiple visit drone routing problem) önermektedir. Her bir dron, müşterilere teslim etmek üzere bir veya daha fazla paketle kamyondan fırlatılmakta, pillerinin değiştirilmesi/şarj edilmesi, yeni bir paket grubu alıp müşteri lokasyonlarına tekrar fırlatılması için kamyona geri dönmektedir. Problemin çözümü için esnek bir sezgisel çözüm önerilmiştir. Ayrıca, dronlar için fiziksel parametreler kullanılarak deneyler ve duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

Salama ve Srinivas (2020), tek bir kamyon ve birden fazla dronun görev aldığı bir rotalama problemi üzerine çalışmıştır ve çözüme yönelik makine öğrenmesi tabanlı bir sezgisel algoritma sunmuştur. Amaç fonksiyonu olarak toplam maliyet ve tamamlanma süresi bağımsız olarak ele alınmaktadır. Daha sonra ödünleşmeler dikkate alınarak bu amaçlar değerlendirilmektedir. Optimize edilecek kilit kararlar, teslimat konumlarının küçük kümelere bölünmesi, küme başına bir birleşme noktası belirlenmesi ve kamyonun her kümedeki müşteri siparişlerinin bir dron veya kamyon tarafından karşılanacağı şekilde

tüm birleşme noktalarından geçirilmesidir. Çalışmada, ilgili tüm kararları birlikte optimize etmek için matematiksel programlama modelleri sunmaktadır.

Teslimatlarda birden fazla kamyon ve birden fazla dronun görev aldığı rotalama problemlerine ait literatürdeki çalışmalar Çizelge 2.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.4. Çok Kamyon-Çok Dron Rotalama Problemleri Literatür Çalışmaları

Yazarlar	**Yayın Yılı**	**Problem Türü**	**Amaç Fonksiyonu**	**Çözüm Yöntemi**
Tong vd.	2022	VRPD	Müşteriye varış zamanlarının en küçüklenmesi	Karma tamsayılı doğrusal olmayan model, Meta-sezgisel
Li vd.	2022	VRPD	Maliyetin enküçüklenmesi	Karma tamsayılı doğrusal olmayan model, Sezgisel
Kuo vd.	2022	VRPD	Maliyetin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Han vd.	2020	CVP-D	Toplam enerji tüketimi ve kamyon sayısının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Reşat	2020	CVP-D	Maliyetlerin ve karbon emisyonlarının enküçüklenmesi ve müşteri memnuniyetinin enbüyüklenmesi	Karma Tamsayılı Model
Wang vd.	2019	VRPD	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Kitjacharo-enchai	2019	VRPD	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Chiang vd.	2019	VRPD	Karbon emisyonlarının ve toplam maliyetin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel

Çizelge2.4.Çok Kamyon-Çok Dron Rotalama Problemleri Literatür Çalışmaları

Yazarlar	**Yayın Yılı**	**Problem Türü**	**Amaç Fonksiyonu**	**Çözüm Yöntemi**
Ham	2018	VRPD	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Chang ve Lee	2018	VRPD	Tamamlanma zamanının enküçüklenmesi	Karma tamsayılı doğrusal olmayan model
Tavanaa vd.	2017	VRPD	Tamamlanma zamanı ve maliyetin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model

Chang ve Lee (2018), problemde tamamlanma zamanının enküçüklenmesi amacıyla çok kamyon ve çok dronlu problemler için doğrusal olmayan bir model sunmuşlardır. Teslimat yoğunluğunun fazla olduğu karmaşık kentsel alanlarda ve kamyonlarla sevkiyatın zor olduğu dağlık alanlarda dron kullanımının etkin olacağını vurgulamışlardır.

Tong vd. (2022), müşteriye varış zamanlarının enküçüklenmesi amacına yönelik Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Model sunmuştur. Motivasyonları, literatürde kamyon ve dronun buluşma noktalarında kamyonların bekleme sürelerinin göz ardı edilmesi olmuştur ve bu boşluğu doldurmak için toplam teslim süresini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Bir depo ve 23 müşteri noktasından oluşan bir teslimat ağını örneklendirmişlerdir. 23 müşteri noktası üç kamyon-dron tarafından ziyaret edilmektedir. Sonuçlar, kamyon-dron teslimatının, geleneksel kamyon teslimatına kıyasla toplam teslimat süresini %20,1 oranında etkili bir şekilde azaltabileceğini göstermiştir. Yalnızca kamyon hızının veya dron hızının arttırılmasının toplam teslimat süresini azaltacağını, ancak en etkili yöntemin kamyon ve dron hızının ikili olarak birlikte arttırılması olduğunu vurgulamışlardır.

Teslimatlarda yalnızca dronların görev aldığı rotalama problemlerine ait literatürdeki çalışmalar Çizelge 2.5'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.5. Dron Rotalama Problemleri Literatür Çalışmaları

Yazarlar	**Yayın Yılı**	**Problem Türü**	**Amaç Fonksiyonu**	**Çözüm Yöntemi**
Kirschstein	2020	DDP	Dronaların enerji tüketimlerinin benzetimi	Formülasyon ve benzetim
Kim vd.	2020	DDP	Teslimat sayısının enbüyüklenmesi	Karma Tamsayılı Model, Sezgisel
Shavarani	2019	DDP	Maliyetin enküçüklenmesi	Tamsayılı doğrusal olmayan model, Sezgisel
Goodchild ve Toy	2018	DDP	Karbon emisyonunun enküçüklenmesi	Sezgisel ve Benzetim
Han vd.	2018	DDP	Mesafelerin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model
Rabta vd.	2018	DDP	Tamamlanma zamanının ve maliyetin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Model
Kim vd.	2017	DDP	Maliyetin enküçüklenmesi	Karma Tamsayılı Modeli, Sezgisel

Goodchild ve Toy (2018), kamyon ve dronlar için karbon emisyonlarının hesaplanması ve kat edilen mesafelerinin tahmin edilmesine yönelik bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmanın amacı dronların kamyon emisyonu açısından net olarak pozitif bir etkiye sahip olup olmadıklarının araştırılmasıdır. Bunun için çeşitli algoritma ve benzetim modelleri kullanmışlardır. Sonuçlar ise kesin bir cevap aramanın zor olduğunu gösterirken dronların teslimat sayısı, enerji kapasitesi, gidilen mesafe gibi pek çok durumdan etkilendiklerini göstermiştir. Genel olarak karbon emisyonu açısından, yakın mesafelerde dronların, uzak mesafelerde kamyonların daha avantajlı olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Daha az müşteri ve teslimatta yine dronların kamyonlara göre avantajlı olduğu görülmektedir

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Problemin Tanımlanması

Tek kamyon ve birden fazla dronun kullanıldığı bir rotalama problemi, lojistik yönetiminde birden fazla amacı barındırabilen bir çizelgeleme problemidir. Çalışmada tek kamyon ve bir veya birden fazla dronun kullanıldığı bir problem ele alınmıştır. Bu problem, sevkiyatların hem kamyon hem de dronlar tarafından yapılabildiği ve kamyon ve dronların senkronize çalıştığı Uçan Yardımcılı Gezgin Satıcı Problemi (Flying Sidekick Traveler Salesman Problem-FSTSP) türündedir.

Probleme iki farklı amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. İlk amaç fonksiyonu servis süreleri toplamının enküçüklenmesidir, müşteriye varışların enküçüklenmesine odaklanmaktadır. Bu amaç, yolun ve maliyetin de en aza indirilmesini sağlar. İkinci amaç fonksiyonu müşteri memnuniyetine odaklanmaktadır. Müşteriler tarafından belirlenen teslim zamanlarına göre, müşteriye olan sevkiyatların toplam gecikmelerini enküçüklemek için çalışmaktadır. Problemin bu amaçlara göre çözümü ile senkronize kamyon ve dronlar için oluşturulan rotalar, müşterilere servis süreleri ve müşteri gecikmeleri elde edilmektedir.

Çalışmada belirtilen kamyon, dronlarla birlikte sevkiyatların gerçekleştirilmesinde görev alırken aynı zamanda dronlar için bir taşıyıcı ve şarj noktası görevi görmektedir. Her bir müşteriye ya kamyon ya da bir dron tarafından sevkiyat yapılmaktadır. Dronların rotaları üç farklı düğümden oluşmaktadır: kamyondan fırlatıldıkları düğüm, müşteriye sevkiyatın yapıldığı düğüm ve kamyon ile dronun buluştuğu düğüm. Senkronizasyonun sağlanabilmesi için kamyon rotalarının da fırlatma ve buluşma düğümlerini içeriyor olması gerekmektedir. Dronlar yükleri kamyondan almakta, kamyon durduğunda kamyondan fırlatılmakta ve sonraki duraklarda kamyona geri dönmektedir.

Problemde müşteri ve depolardan oluşan bir düğümler kümesi tanımlanmıştır. Bu düğümler arası yol uzunlukları birim zaman (dk) cinsinden probleme dahil edilmiştir. Bu

veriler gerçek hayat verilerinin türetilmesi ile oluşturulmuştur. Depo olarak İzmir bölgesindeki bir ecza deposu ve müşteri düğümleri olarak eczaneler belirlenmiştir. Harita üzerindeki gerçek uzunluklar ele alınmıştır.

Her bir müşteri için belirlenen teslim zamanına kadar servis sunulması gerekmektedir. Aksi halde ilgili müşteriler için gecikmeler söz konusu olmaktadır.İkinci amaç fonksiyonu gecikmeler toplamının enküçüklenmesidir.

Her bir müşteri için önceden belirlenen işlem süreleri bulunmaktadır ve bu süre kamyon ve dronlar için değişiklik göstermektedir. Sürelerdeki farklılığın sebebi kamyon teslimatlarında bir sürücünün bulunması ve hizmetin sürücü tarafından gerçekleştirilmesidir. Dronlar, otomatik olarak müşterilere teslimat yapmaktadırlar.

Homojen kabul edilen dron filosu için uçuş menzili, dronların birim enerjilerine bağlıdır. Dronların enerjileri ise dronların fiziksel özellik ve kapasitelerine, hızlarına ve taşıdıkları yüklere bağlıdır. Problemde farklı hızlar için ortaya çıkan farklı uçuş menzilleri araştırılmıştır.

Varsayımlar

- Tüm müşterilere mutlaka hizmet verilmelidir.
- Tüm müşteriler ya kamyon ya da dron vasıtasıyla yalnızca bir kez ziyaret edilip hizmet almaktadır.
- Tüm müşteri talepleri, teslim zamanları, yol uzunlukları, hizmet süreleri ve dron özellikleri önceden bilinmektedir.
- Dronlar, kamyon hareket etmeden önce depodan fırlatılabilmektedir.
- Dronlar yalnızca müşteri düğümlerinde ve kamyon durduğunda fırlatılabilmektedir. Yolda herhangi bir zamanda fırlatılamamaktadır.
- Dronlar kamyondan fırlatıldıklarında, sonraki müşteri düğümlerinde veya depoda kamyon ile buluşmak zorundadır.
- Dronlar her rotada yani gönderimde yalnızca tek müşteri talebine karşılık verebilmektedir.
- Dronlar fiziksel kapasitelerini aşmayan yükler için teslimat yapabilmektedir.

- Kamyon dronu fırlattıktan sonra beklememektedir ancak sonraki düğümlerden birinde buluşmak için dronu bekleyebilmektedir.
- Kamyon ve dronun buluşma noktalarında önce gelen araç diğerini beklemektedir.
- Dron filosu homojendir, aynı veriler tüm dronlar için geçerlidir.
- Dron menzilleri dronun enerjisine, özelliklerine, hızına ve taşıdıkları yüke bağlıdır.
- Dronlar kamyona döndüklerinde anında şarj olabilmektedir.
- Dronların kamyonda şarj oldukları varsayıldığından, dron menzilleri her dron rotasında yenilenmektedir.
- Kamyon gittiği müşteriye hizmet verdikten sonra durduğu esnada eğer dron rotası başlıyor ise dronu fırlatmaktadır.
- Aynı anda birden fazla dron fırlatılabilmektedir.

Problemin çözümünde karma tamsayılı matematiksel model kullanılmıştır. Matematiksel modelin geliştirilmesinde Moshref-Javadi vd. (2020) tarafından yapılan son kilometre lojistiği konulu araştırmasından esinlenilmiştir.

3.2. Notasyon ve Matematiksel Model

3.2.1. Notasyon

Kümeler

N: {0,1,2,…,c,c+1} Düğümler kümesi (0 ve c+1 depodur)

C: {1,2,…,c} Müşteriler kümesi

C_0: {0,1,2,…,c} Başlangıç noktası olan depo ve müşteriler kümesi

C_E: {1,2,…,c,c+1} Müşteriler ve bitiş noktası olan depo kümesi

U: {1,2,…,u} Dronlar kümesi

ϑ : {15, 23, 30} Dronların hızlarına ilişkin küme

Parametreler

c: Müşteri sayısı

u: Dron sayısı

M: Büyük bir sayı

dk_{ij}: i. düğüm ve j. düğüm arasında kamyon ile seyahat süresi

dd_{ij}: i. düğüm ve j. düğüm arasında dron ile seyahat süresi

St_i: Kamyonun i düğümündeki işlem süresi

Sd_i: Dronun i düğümündeki işlem hizmet süresi

due_i: i. müşterinin teslim zamanı

L: Dron menzili

E_{max}: Maksimum dron enerjisi

E: Dronun birim enerjisi

K: Aerodinamik sürükleme katsayısı

A: Dronun ön yüze bakan alanı

D: Havanın yoğunluğu

ϑ: Dronun hava hızı

ep: Dronun boş ağırlığı

$f_{i,j}$: Dronun taşıdığı yükün ağırlığı

g: Yerçekimi ivmesi

b: Dronun genişliği

Karar Değişkenleri

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{kamyon, i noktasından j noktasına hareket ediyor ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Y_{uijs} = 1, dron u, i noktasından j noktasına gidiyor ve s noktasında kamyon ile buluşuyor ise

0, diğer durumlarda

P_{ij}= 1, i noktası, j noktasından önce kamyon ile ziyaret ediliyor ise

0, diğer durumlarda

Z_i = kamyon rotasında i noktasının pozisyonu

at_i = kamyonun i noktasına varış zamanı

ad_{iu} = dron u'nun i noktasına varış zamanı

lt_i= kamyonun i noktasından ayrılma zamanı

ld_{iu} = dron u'nun i noktasından ayrılma zamanı

Tt_i = kamyonun i. müşteriye gecikme miktarı

Td_{iu} = dron u'nun i. müşteriye gecikme miktarı

3.2.2. Matematiksel Model

Problemin çözümünde karma tamsayılı matematiksel model kullanılmıştır. Matematiksel modelin geliştirilmesinde Moshref-Javadi vd. (2020) tarafından yapılan son kilometre lojistiği konulu araştırmasından esinlenilmiştir. Esinlenilen modele, yeni amaç fonksiyonu ve kısıtlar eklenmiştir. İlave edilen ilgili kısıt setleri: 3.2, 3.4, 3.13, 3.14, 3.16, 3.17, 3.18, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29 dır.

$$\text{Min} \sum_{i\in C} at_i + \sum_{i\in C}\sum_{u\in U} ad_{iu} \quad (3.1)$$

$$\text{Min} \sum_{i\in C} Tt_i + \sum_{i\in C}\sum_{u\in U} Td_{iu} \quad (3.2)$$

$$\sum_{j\in C_E} x_{Oj} = 1 \quad (3.3)$$

$$\sum_{i\in C_0} x_{i,C+2} = 1 \quad (3.4)$$

$$\sum_{\substack{g\in C_0 \\ g\neq i}} x_{gi} = \sum_{\substack{j\in C_E \\ j\neq i}} x_{ij}, \qquad \forall i \in C \quad (3.5)$$

$$\sum_{\substack{i\in C_0 \\ i\neq j}} x_{ij} + \sum_{\substack{i\in C_0 \\ i\neq j}} \sum_{s\in C_E}\sum_{u\in U} y_{ijs}^{u} = 1, \qquad \forall j \in C \quad (3.6)$$

$\sum_{j\in C}\sum_{s\in C_E} y_{ijs}^{u} \leq 1,$ $\forall i \in C_0,\ \forall u \in U$ (3.7)

$\sum_{i\in C_0}\sum_{j\in C} y_{ijs}^{u} \leq 1,$ $\forall s \in C_E,\ \forall u \in U$ (3.8)

$\sum_{h\in C_0} x_{h_i} + \sum_{g\in C} x_{gs} \geq 2y_{ijs}^{u},$ $\forall i \in C,\ \forall j \in C,\ \forall s \in C_E,\ \forall u \in U$ (3.9)

$y_{0js}^{u} \leq \sum_{g\in C_0} x_{gs},$ $\forall j \in C,\ \forall s \in C_E,\ \forall u \in U$ (3.10)

$lt_i + dk_{ij} - (1 - x_{ij})M \leq at_j,$ $\forall i \in C_0,\ \forall j \in C_E,\ i \neq j$ (3.11)

$ld_{iu} + dd_{i_j} - (1 - \sum_{s\in C_E} y_{ijs}^{u})\ M \leq ad_{ju},$ $\forall i \in C_0,\ \forall j \in C_E,\ \forall u \in U$ (3.12)

$at_i + St_i - (1 - x_{ij})M \leq lt_i,$ $\forall i \in C_0,\ \forall j \in C_E,\ i \neq j$ (3.13)

$ad_{iu} + Sd_i - (1 - \sum_{s\in C_E} y_{ijs}^{u})\ M \leq ld_{iu},$ $\forall i \in C_0,\ \forall j \in C_E,\ i \neq j,\ \forall s \in C_E,\ \forall u \in U$ (3.14)

$ld_{iu} - (1 - \sum_{j\in C}\sum_{s\in C_E} y_{ijs}^{u})\,M \leq lt_i,$ $\forall i \in C_0,\ \forall u \in U$ (3.15)

$ad_{ju} + Sd_j + dd_{js} - (1 - \sum_{i\in C_0} y_{ijs}^{u})\ M \leq lt_s,$ $\forall j \in C,\ \forall s \in C_E,\ \forall u \in U$ (3.16)

$at_i - St_i - (1 - \sum_{j\in C}\sum_{s\in C_E} y_{ijs}^{u})M \leq ld_{iu},$ $\forall i \in C_0,\ \forall u \in U$ (3.17)

$ad_{ju} + Sd_j + dd_{js} - (2 - \sum_{i\in C_0} y_{ijs}^{u} - \sum_{v\in C}\sum_{h\in C_E} y_{svh}^{u})\ M \leq ld_{su},$ $\forall s \in C_E,\ \forall j \in C,\ \forall u \in U$ (3.18)

$1 - (c + 2)(1 - x_{ij}) \leq z_j - z_i,$ $\forall i \in C_0,\ \forall j \in C_E,\ i \neq j$ (3.19)

$(c + 2)(1 - x_{ij}) + 1 \geq z_j - z_i,$ $\forall i \in C_0,\ \forall j \in C_E,\ i \neq j$ (3.20)

$(c + 2)\ p_{ij} \geq z_j - z_i,$ $\forall i \in C_0,\ \forall j \in C_E,\ i \neq j$ (3.21)

$p_{ij} + p_{ji} = 1,$ $\forall i \in C,\ \forall j \in C,\ i \neq j$ (3.22)

$-(3 - p_{ig} - y_{ijs}^{u} - \sum_{\substack{v\in C\\ v\neq i\\ v\neq s\\ v\neq g}}\sum_{\substack{h\in C_E\\ h\neq i\\ h\neq s}} y_{gvh}^{u})\ M \leq ld_{gu} - at_s,$ $\forall i \in C_0,\ \forall s \in \{C_E: s \neq i\},\ \forall g \in \{C: g \neq i, g \neq s\},\ \forall j \in \{C: j \neq g\},\ u \in U$ (3.23)

$L_\vartheta + (1 - y_{ijs}^{u})\ M \geq at_s - ld_{iu},$ $\forall i \in C_0,\ \forall j \in \{C: j \neq i\},\ \forall s \in \{C: s \neq i\},\ u \in U\ \forall \vartheta$ (3.24)

$y_{ijs}^{u}\ (dd_{ij} + dd_{js}) \leq L_\vartheta,$ $\forall i \in C_0,\ \forall j \in \{C: j \neq i\},\ \forall s \in \{C_E: s \neq i\},\ u \in U\ \forall \vartheta$ (3.25)

$at_i - due_i \leq Tt_i,$ $\forall i \in C$ (3.26)

$ad_{iu} - due_i \leq Td_i,$ $\forall i \in C,\ u \in U$ (3.27)

$E_\vartheta = \frac{1}{2}(K)(A)(D)(\vartheta)^3 + \frac{[(ep + f_{i,j})g)]^2}{Db^2(\vartheta)}$ $\forall \vartheta$ (3.28)

$$L_{\vartheta} = \frac{Emax}{E_{\vartheta}} \qquad \forall \vartheta \qquad (3.29)$$

$$x_{ij}, p_{ij} \in \{0,1\}, \qquad \forall i \in N, \quad \forall j \in N \qquad (3.30)$$

$$y_{ijs}^{u} \in \{0,1\}, \qquad \forall i \in N, \quad \forall j \in N, \quad \forall s \in N, \quad \forall u \in U \qquad (3.31)$$

$$1 \leq z_i \leq (c+2), \qquad \forall i \in N \qquad (3.32)$$

$$at_i, lt_i \geq 0, \qquad \forall i \in N \qquad (3.33)$$

$$ad_{iu}, ld_{iu} \geq 0, \qquad \forall i \in N, \quad \forall u \in U \qquad (3.34)$$

Amaç fonksiyonu (1) kamyon ve dronların müşterilere servis süreleri toplamının enküçüklenmesidir. Alternatif amaç fonksiyonu olan amaç fonksiyonu (2) ise kamyon ve dronlar tarafından yapılan sevkiyatların gecikmelerinin enküçüklenmesidir.

Kısıt setleri (3-10), kamyonun ve dronların rotalarını oluşturmaktadır ve aralarındaki matematiksel ilişkiyi sağlamaktadır. Kısıt seti (3), kamyonun başlangıç deposundan çıkıp müşteriye doğru hareket etmesini sağlamaktadır. Kısıt seti (4), kamyonun müşteriden son depoya dönmesini garantilemektedir. Kısıt seti (5), kamyon bir müşteriye gidiyor ise, kamyonun aynı müşteriden ayrılmasını garanti etmektedir. Böylece kamyon rotasının akışını sağlamaktadır. Kısıt seti (6), her bir müşterinin kamyon veya dron tarafından yalnızca bir kez ziyaret edildiğini belirtmektedir. Kısıt seti (7), dron fırlatıldığında tam olarak bir müşteriyi ziyaret edebileceğini ve aynı müşteriden kamyona tam olarak bir kez geri dönebileceğini göstermektedir. Kısıt seti (8), dronun bir düğümden ayrılmasını, ayrıldığında bir müşteriyi ziyaret etmesini ve son olarak kamyon ile buluşmasını sağlamaktadır. Kısıt seti (9), bir dron *i* noktasından fırlatıldığında ve *s* noktasında kamyona geri dönüp kamyon ile buluştuğunda, kamyon rotasının hem *i* hem de *s* düğümlerini içermesini garantilemektedir. Kısıt seti (10), bir dronun depodan veya kamyondan fırlatıldığında ve *s* noktasında kamyona geri döndüğünde, kamyonun dron ile buluşabilmesi için kamyon rotasının *s* düğümünü içermesi gerektiğini göstermektedir.

Kısıt seti (11), kamyonun müşterilere varış sürelerinin hesaplanmasında kullanılırken, kısıt seti (12), dronların müşterilere varış sürelerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Kısıt setleri (13-18), kamyon ve dronların müşterilerden ayrılma zamanlarının tutarlı olmasını sağlamaktadır. Kısıt seti (13), kamyonun herhangi bir düğümden ayrılma zamanının, bu düğüme varış zamanından daha büyük olmasını garantilemektedir. Kısıt seti (14) dronun herhangi bir düğümden ayrılma zamanının, bu düğüme varış zamanından daha büyük olmasını garantilemektedir. Kısıt seti (15), kamyonun herhangi bir düğümden ayrılma zamanının, bu düğümden fırlatılacak tüm dronların düğümden ayrılma zamanından daha büyük olacağını göstermektedir. Kısıt seti (16), kamyonun *s* düğümünden, *s* düğümünde kamyona geri dönmesi planlanmış tüm dronlar bu düğüme ulaştıktan sonra ayrılmasını sağlamaktadır. Böylece kamyon düğümden ayrılmadan önce tüm dronlarla buluşmuş olması garantilenmektedir. Kısıt seti (17), kamyon, *i* düğümüne ulaşmadığı sürece herhangi bir dronun *i* düğümünden fırlatılamayacağını göstermektedir. Kısıt seti (18), bir dronun *s* düğümünde kamyona geri dönmesi ve *s* düğümünden yeniden fırlatılmasının planlanması durumunda, dronun *s* düğümünden ayrılma zamanının, *s* düğümüne varış zamanından daha büyük olmasını sağlamaktadır.

Kısıt setleri (19) ve (20), kamyon rotasının tutarlı olmasını sağlamaktadır. Kısıt setleri (21) ve (22), eğer kamyon müşteri *i*'den sonra müşteri *j*'yi ziyaret ederse p_{ij}değerinin 1 olmasını sağlamaktadır. Kısıt seti (23), kamyon rotasındaki *s* düğümünden sonra yer alan *g*düğümünden belirli dron *u*'nun fırlatılma zamanının, kamyonun *s* düğümüne varma zamanından daha büyük olmasını ve p_{ij} ve y_{ijs}^{u} arasında ilişki kurulmasını sağlamaktadır.

Kısıt setleri (24) ve (25) dronların uçuş menzili kısıtlamaları ile ilişkilidir. Kısıt seti (24)'e göre dron *u, j* düğümündeki müşteriye hizmet etmek için *i* düğümünden fırlatılır ve *s* düğümünde kamyona geri döner ise, dron *u*'nun *i* düğümünden *j* düğümüne ziyaret süresi, *j* düğümünden *s* düğümüne ziyaret süresi ve *s* düğümünde kamyonu bekleme süresi, uçuş menzilinden küçük olmalıdır. Bu kısıt, kamyon, drondan sonra *s* noktasına ulaştığında aktif hale gelmektedir. Kısıt seti (25), dron *u*'nun düğüm *i*'den düğüm *j*'ye ve düğüm *s*'ye

ulaştığında toplam seyahat süresinin uçuş menzilinden daha küçük olmasını sağlamaktadır. Bu kısıt, dron *u*'nun düğüm *s*'ye varış zamanı kamyonun *s*'ye varış zamanından büyükse, yani kamyon dronu beklerse aktifleşmektedir.

Kısıt setleri (26) ve (27) sırasıyla kamyon ve dron tarafından yapılan sevkiyatlarda müşteriye gecikmelerin hesaplanmasını sağlamaktadır.

Kısıt seti (28), dronların kapasitelerine ve fiziksel özelliklerine göre enerjilerini hesaplamaktadır. Enerji formülasyonunun hesaplanmasında Thibbotuwawa vd.'nin (2019) çalışmasından esinlenilmiştir. Kısıt seti (29), dronların enerjilerinden uçuş menzili değerlerinin hesaplamasını göstermektedir. Çizelge3.1'de enerji kısıtlarına ait parametreler ve birimleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Enerji formülasyonuna ait simge ve birimler

Simge	Açıklama	Birim
L	Uçuş menzili	dk
$Emax$	Maksimum dron enerjisi	$kg.m^2/s^2$
E	Dronun birim enerjisi	$kg.m^2/s^3$
C	Aerodinamik sürükleme katsayısı	-
A	Ön yüze bakan alan	m^2
D	Havanın yoğunluğu	kg/m^3
ϑ	Dronun hava hızı	m/s
ep	Dronun boş ağırlığı	kg
f	Dronun taşıdığı yükün ağırlığı	kg
g	Yerçekimi ivmesi	m/s^2
b	Dronun genişliği	m

Çizelge 3.1'de kısıt setleri 28 ve 29' a ait parametreler ve birimleri verilmiştir. Kısıt seti 28, dronun birim enerjisini hesaplamaktadır. Formülasyonda gerçek hayatla tutarlı veriler kullanılmıştır. Aerodinamik sürükleme katsayısı 0,3 alınmıştır. Dronun ön yüze bakan alanı 0,1 m^2, genişliği 1 m, boş ağırlığı 36 kg, taşıdığı yükün ağırlığı 4 kg alınmıştır. Yerçekimi ivmesi 9,8 m/s^2 ve havanın yoğunluğu 1,225 kg/m^3 kabul edilmiştir. Dronların hız değerlerinin model sonuçlarına katkısı inceleneceğinden farklı hız değerleri (15, 23,

30) alınmıştır. Kısıt seti 29'da dronların uçuş menzili formülasyonu tanıtılmıştır. Maksimum dron enerjisi kabul edilen 12.000.000 $kg.m^2/s^2$ değerinin, kısıt seti 28'de hesaplanan dronlara ait birim enerji değerlerine bölünmesi ile uçuş menzili hesaplanmaktadır. Verilen 3 farklı hız değeri için çıkan uçuş menzili değerleri 23, 35 ve 42 dakikadır. Hıza bağlı oluşan farklı uçuş menzili değerlerinin model sonuçlarına etkisi incelenmiştir.

Kısıtsetleri (30-34), değişkenlerin türlerini ve kabul edilebilir değer aralıklarını göstermektedir. Kısıt seti (30), x_{ij} ve p_{ij} değişkenlerinin 0 ya da 1 değeri almasını sağlarken, kısıt seti (31), y_{ijs}^{u} değişkeninin 0 ya da 1 değerini almasını sağlamaktadır. Kısıt seti (32), z_i değerinin düğüm sayısı aralığında olmasını sağlamaktadır. Kısıt setleri (33) ve kısıt (34), kamyon ve dronların düğümlerden ayrılma zamanlarının ve düğümlere varış zamanlarının 0'a eşit veya büyük olmasını sağlamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, üçüncü bölümde tanıtılan tek kamyon çok dronun görev planlaması probleminin, bir örnek üzerinde türetilen test problemleri için model sonuçları ve analizi verilmiştir.

Tasarlanan problemde gerçek hayat verileri alınmıştır. Seyahat süresi verileri için İzmir'deki bir ecza deposu ve bu ecza deposu çevresindeki eczanelerin konumları kullanılmıştır. Şekil 4.1'de test problemlerinde verilen düğümlerin harita görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.1. Test problemlerinde verilen düğümlerin harita görüntüsü

Güncel olarak şehir merkezlerinde dron uçuşlarının yapılması yasal değildir. Ancak bu konuda çalışmalar başlamıştır. Ayrıca dron uçuşları gün geçtikçe artmakta ve farklı alanlarda yayılmaya başlamaktadır.

Şekil 4.1'de gösterilen düğümlerin kara aracına göre seyahat süresi (dk) matrisleri Çizelge 4.1'de, drona göre seyahat süresi (dk) matrisleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

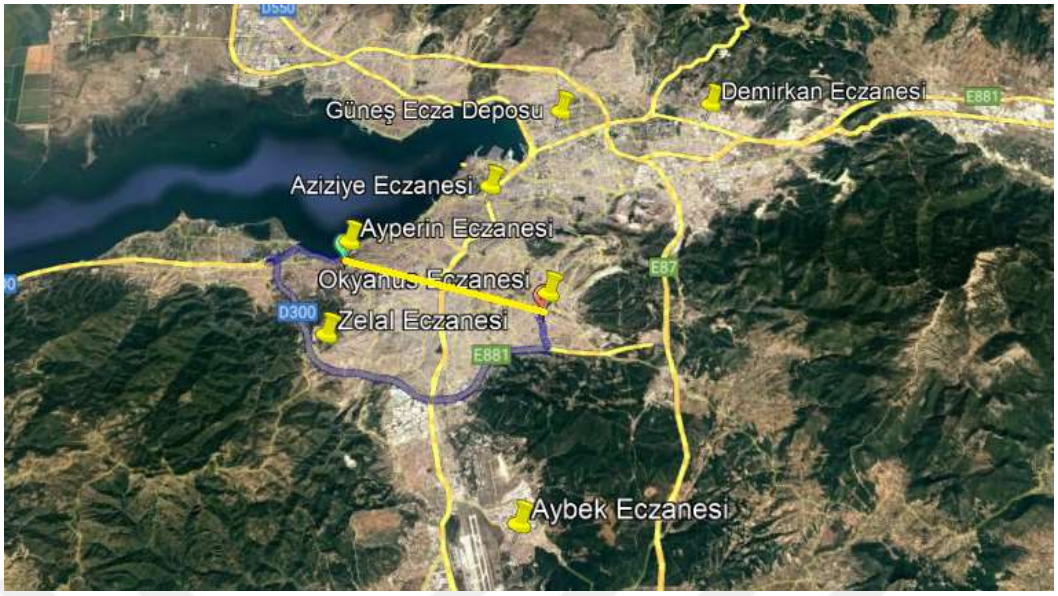
Çizelge 4.1. Düğümlerin kara aracına göre seyahat süresi matrisi

Düğüm	Konum	1 Ecza Deposu	2 Ayperin Eczanesi	3 Zelal Eczanesi	4 Okyanus Eczanesi	5 Demirkan Eczanesi	6 Aybek Eczanesi	7 Aziziye Eczanesi
1	Ecza Deposu	0	22	24	22	13	30	16
2	Ayperin Eczanesi	22	0	9	23	27	22	14
3	Zelal Eczanesi	24	9	0	13	23	15	16
4	Okyanus Eczanesi	22	23	13	0	21	19	16
5	Demirkan Eczanesi	13	27	23	21	0	29	15
6	Aybek Eczanesi	30	22	15	19	29	0	22
7	Aziziye Eczanesi	16	14	16	16	15	22	0

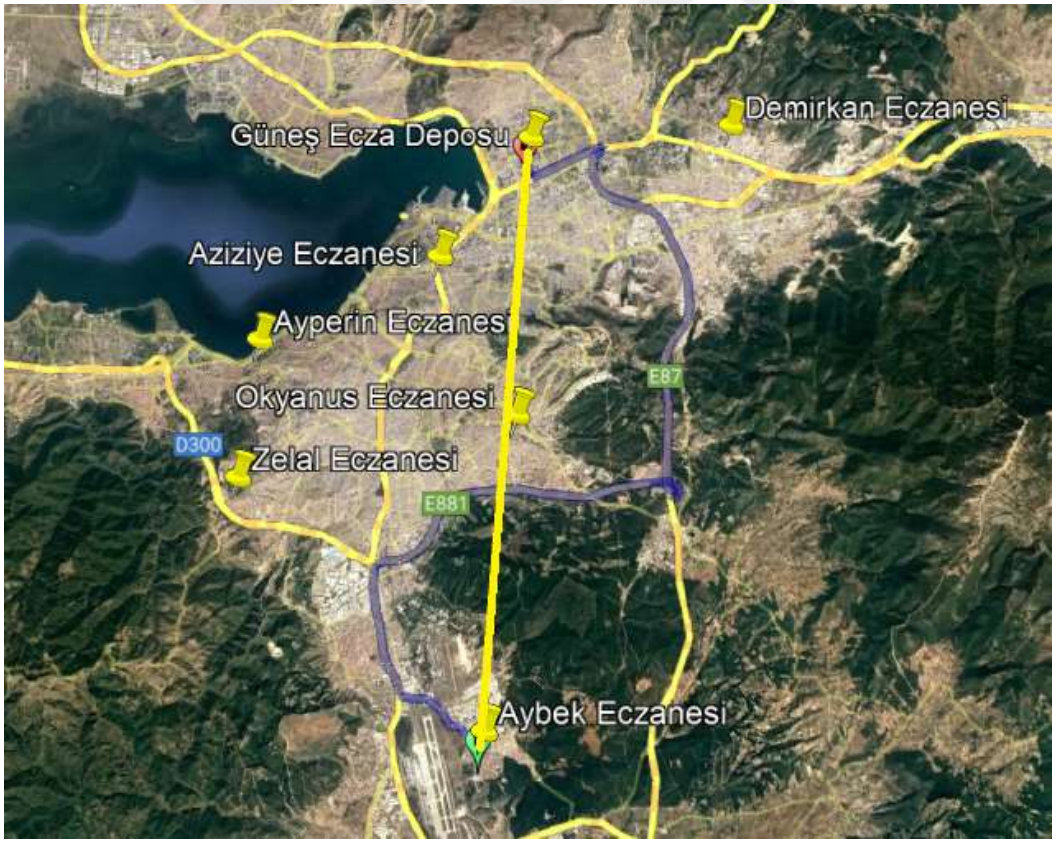
Çizelge 4.2. Düğümlerin hava aracına göre seyahat süresi matrisi

Düğüm	Konum	1 Ecza Deposu	2 Ayperin Eczanesi	3 Zelal Eczanesi	4 Okyanus Eczanesi	5 Demirkan Eczanesi	6 Aybek Eczanesi	7 Aziziye Eczanesi
1	Ecza Deposu	0	7	10	6	4	13	3
2	Ayperin Eczanesi	7	0	3	6	11	9	4
3	Zelal Eczanesi	10	3	0	6	13	7	6
4	Okyanus Eczanesi	6	6	6	0	8	7	4
5	Demirkan Eczanesi	4	11	13	8	0	14	7
6	Aybek Eczanesi	13	9	7	7	14	0	10
7	Aziziye Eczanesi	3	4	6	4	7	10	0

Çizelgelerdeki veriler incelendiğinde kara aracına ait seyahat sürelerinin daha uzun olduğu görülmektedir. Kamyon karayolları haritasındaki yolu takip edilirken, dron iki nokta arasındaki kuş uçuşu yolu takip etmektedir. Şekil 4.2 ve 4.3'de kara aracı ve dron seyahat sürelerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Ayperin Eczanesi ve Okyanus Eczanesi arasında kamyon ve dron uzaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 4.3. Aybek Eczanesi ve Güneş Ecza Deposu arasında kamyon ve dron uzaklıklarının karşılaştırılması

Şekil 4.2 ve 4.3'de gösterildiği gibi kara araçlarının aldıkları yol uzunlukları (mor renkli rota) yolun durumuna bağlı olarak değişirken hava araçlarında kuş uçuşu mesafeler (sarı renkli rota) söz konusudur. Bu durum dronların seyahat sürelerinin kamyonların seyahat sürelerinden daha kısa olmasına sebep olmaktadır.

İşlem süreleri, kamyon ve dron teslimatlarında farklılık gösterdiği gibi, müşteri temelinde de farklılıklar içermektedir. Kamyon ile yapılan sevkiyatlarda bir sürücü bulunmakta ve paketi sürücü teslim etmektedir. Dron ile yapılan sevkiyatlarda işlem süreleri, kamyon ile yapılan sevkiyatlara kıyasla daha kısadır. Çünkü dron, müşteriye en yakın noktaya kadar ulaşmakta ve paketi müşteri almaktadır. Kamyon ve dron ile teslimatlarda müşteri noktalarına bağlı olarak farklı işlem süreleri söz konusudur. Ek-1'de kamyonla yapılan sevkiyatların işlem süreleri $St_{(i)}$ve dronla yapılan sevkiyatların işlem süreleri $Sd_{(i)}$ olarak gösterilmiştir.

Teslim zamanları her müşteriye ait, sevkiyatın talep edildiği zamanlardır. İlk amaç fonksiyonu olan toplam servis süresinin enküçüklenmesi üzerinde bir etkisi yoktur. İkinci amaç fonksiyonu olan toplam gecikmelerin enküçüklenmesinde etkilidir. Teslim zamanını geçen sevkiyatlar problemde gecikmeye sebep olmaktadır. İkinci amaç fonksiyonunda bu gecikmeler en aza indirilmektedir. Müşterilerin teslim zamanları Ek-1'de gösterilmiştir.

Problem GAMS Base Module 24.0.2 programının CPLEX çözücüsünde çözülmüştür. Çözüm aşamasında Casper Excalibur Intel(R) Core (TM) i5 işlemci özelliğine, 16 GB RAM ve 4.50 GHz hıza sahip bilgisayar kullanılmıştır.

4.1 Servis Süreleri Toplamının Enküçüklenmesi Amaç Fonksiyonu İçin Sonuçlar

İlk amaç fonksiyonu servis süreleri toplamının enküçüklenmesidir. Müşteri sayılarına göre farklı dron sayıları ve farklı uçuş menzilleri temelinde türetilen veriler, tasarlanan matematiksel modelin GAMS'in CPLEX çözücüsünde çözülmüştür. Sonuçlar servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre Çizelge 4.3, 4.4 ve 4.5'de incelenmiştir.

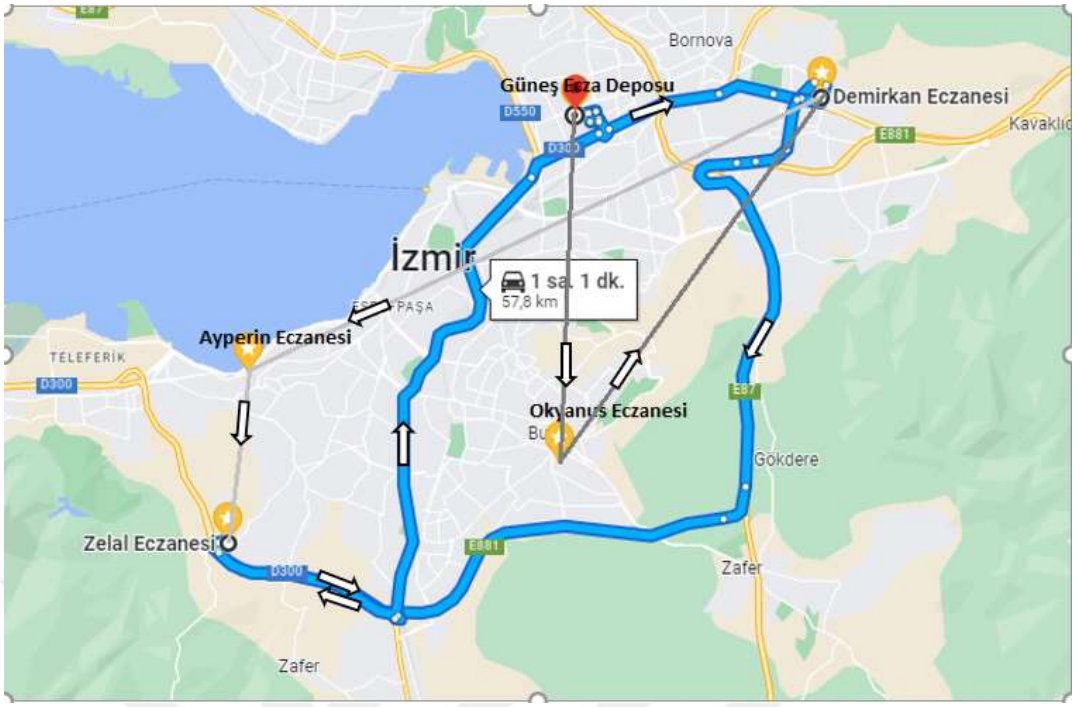
4 müşterili test problemlerinin model sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Dört müşterili test problemlerinde en küçük toplam servis süresi amaç fonksiyonu için sonuçlar

Test Problemi	Müşteri Sayısı	Dron Sayısı	Hız	Uçuş Menzili	Kullanılan Dron Sayısı	Dron Rotası Sayısı	Amaç Fonksiyonu 1	
							∑Servis Süresi (dk)	Çözüm Süresi (s)
1	4	1	15	23	1	2	87	6,433
2	4	1	23	35	1	2	87	10,050
3	4	1	30	42	1	2	87	10,233
4	4	2	15	23	2	3	54	1,033
5	4	2	23	35	2	3	54	6,000
6	4	2	30	42	2	3	54	7,950
7	4	3	15	23	3	3	36	4,200
8	4	3	23	35	3	3	36	6,133
9	4	3	30	42	3	3	36	6,383
10	4	4	15	23	4	4	27	3,800
11	4	4	23	35	4	4	27	4,000
12	4	4	30	42	4	4	27	5,850

Çizelge 4.3'de sunulan, 4 müşterili test problemleri için ilk amaç fonksiyonuna göre çözümler incelendiğinde bir dron kullanımı ile çıkan toplamda 87 dakikalık servis süresinin, dört dron kullanımında toplam 27 dakikaya düştüğü gözlemlenmiştir. Çizelgedan okunduğu gibi dört dron kullanılan durumlarda her müşteriye bir dron gönderilmiştir, kamyon ile sevkiyat yapılmamıştır. Dronlar aktif olarak kullanılmıştır. Bu problemlerde hız ve hıza bağlı oluşan uçuş menzilinin etkisi gözlemlenmemiştir. Çünkü dronlardaki hız değişimi kara araçlarındaki kadar arttırılamamaktadır. Dronlardaki hız değişim aralığı kamyonlara göreceli olarak daha dardır.

Çizelgedeki 3 numaralı test probleminin servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre çözülmesi sonucu ortaya çıkan rota Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. 3. test probleminin en küçük toplam servis süresi amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası

Şekil 4.4'te 3. test probleminin ilk amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası verilmiştir. Kalın çizgilerle takip edilen yol, kara aracına ait rotadır. İnce çizgiler ile drona ait rotalar gösterilmiştir. Kamyon, Güneş Ecza Deposu'ndan ilk olarak Demirkan Eczanesi'ne gitmektedir. Devamında Zelal Eczanesi'ne gitmekte ve sonrasında depoya geri dönmektedir. Dron, depodan Okyanus Eczanesi'ne fırlatılmakta, hizmet verdikten sonra Demirkan Eczanesi'nde kamyon ile buluşmaktadır. Sonrasında Ayperin Eczanesi'ne fırlatılmakta ve burada hizmet verdikten sonra Zelal Eczanesi'nde kamyon ile buluşmaktadır.

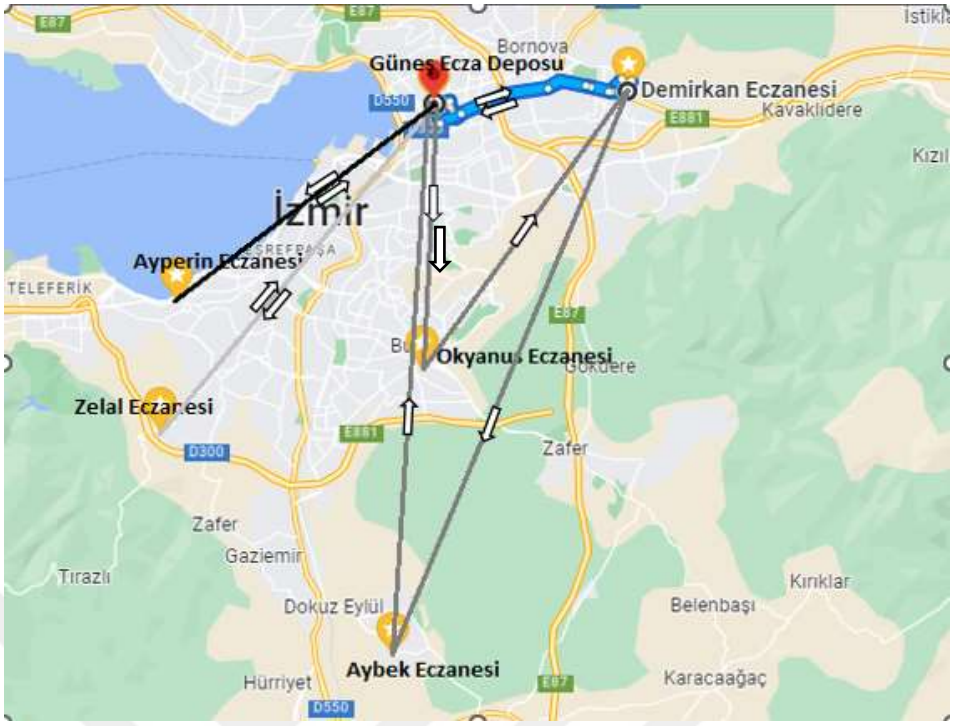
5 müşterili test problemlerinin model sonuçları Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. 5 müşterili test problemlerinde servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonu için sonuçlar

Test Problemi	Müşteri Sayısı	Dron Sayısı	Hız	Uçuş Menzili	Kullanılan Dron Sayısı	Dron Rotası Sayısı	Amaç Fonksiyonu 1	
							∑Servis Süresi (dk)	Çözüm Süresi (s)
13	5	1	15	23	1	3	135	15,533
14	5	1	23	35	1	3	135	15,116
15	5	1	30	42	1	3	135	8,800
16	5	2	15	23	2	4	94	17,816
17	5	2	23	35	2	4	90	23,116
18	5	2	30	42	2	4	90	34,566
19	5	3	15	23	3	4	73	19,433
20	5	3	23	35	3	4	67	29,066
21	5	3	30	42	3	4	67	24,450
22	5	4	15	23	4	4	55	18,000
23	5	4	23	35	4	4	49	3,200
24	5	4	30	42	4	4	49	4,250
25	5	5	15	23	4	4	55	18,035
26	5	5	23	35	5	5	40	12,666
27	5	5	30	42	5	5	40	4,350

Çizelge 4.5.'de verilen, 5 müşterili test problemleri için ilk amaç fonksiyonuna göre çözümler incelendiğinde bir dron kullanımı ile çıkan toplam 135 dakikalık servis süresinin, beş dron kullanımında toplamda 40 dakikaya düştüğü gözlenmiştir. Beş dronun kullanıldığı durumda her müşteriye bir dron gönderilmiş ve kamyon ile teslimat yapılmamıştır. Dronların hepsi aktif olarak kullanılmıştır. Bir dron kullanıldığında hız ve hıza bağlı uçuş menzilinin etkisi görülmezken dron sayısı arttıkça amaç fonksiyonuna etkisi görülmektedir. Bu durum problem büyüklüğü arttıkça dron hızı ve uçuş menzili etkisinin amaç fonksiyonu üzerinde daha fazla etkili olacağını göstermektedir.

Çizelge 4.5'de 20 numaralı test probleminin servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonun göre çözülmesi sonucu ortaya çıkan rota şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. 20. test probleminin servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası

Şekil 4.5'te 20. test probleminin ilk amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası verilmiştir. Kalın çizgilerle takip edilen yol, kara aracına ait rotadır. İnce çizgiler ile drona ait rotalar gösterilmiştir. Üç dron kullanıldığından farklı dronlar farklı renklerle gösterilmiştir. Kamyon Güneş Ecza Deposu'ndan yola çıkıp Demirkan Eczanesi'ne sevkiyat yapmakta ve devamında depoya geri dönmektedir. Birinci dron, depodan Zelal Eczanesi'ne fırlatılmakta ve hizmet verdikten sonra depoya geri dönmektedir. İkinci dron depodan Okyanus Eczanesi'ne fırlatılmakta, hizmet verdikten sonra Demirkan Eczanesi'nde kamyon ile buluşmaktadır. Sonrasında Aybek Eczanesi'ne fırlatılmakta, hizmet verdikten sonra da depoya geri dönmektedir. Son olarak üçüncü dron, depodan Ayperin Eczanesi'ne fırlatılmakta ve hizmet verdikten sonra depoya geri dönmektedir.

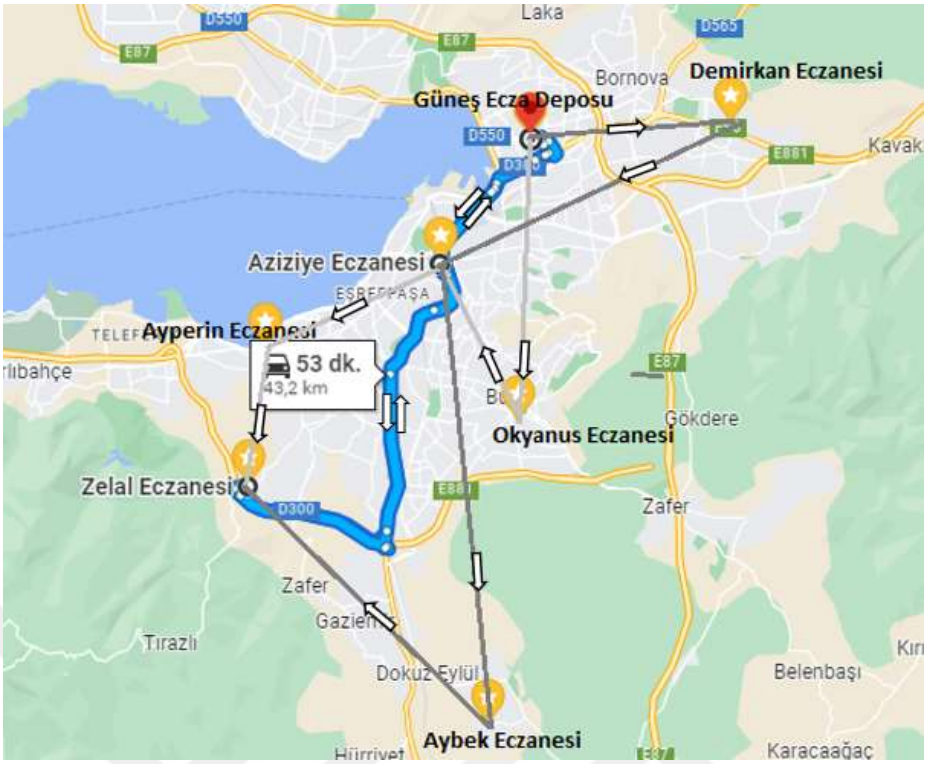
6 müşterili test problemlerinin model sonuçları Çizelge4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. 6 müşterili test problemlerinde en küçük toplam servis süresi amaç fonksiyonu için sonuçlar

Test Problemi	Müşteri Sayısı	Dron Sayısı	Hız	Uçuş Menzili	Kullanılan Dron Sayısı	Dron Rotası Sayısı	Amaç Fonksiyonu 1	
							∑Servis Süresi (dk)	Çözüm Süresi (s)
28	6	1	15	23	1	3	166	294,566
29	6	1	23	35	1	3	166	91,034
30	6	1	30	42	1	3	166	44,733
31	6	2	15	23	2	4	113	289,900
32	6	2	23	35	2	4	113	192,833
33	6	2	30	42	2	4	113	284,533
34	6	3	15	23	3	5	87	308,516
35	6	3	23	35	3	5	87	345,900
36	6	3	30	42	3	5	87	337,883
37	6	4	15	23	4	5	71	312,300
38	6	4	23	35	4	5	69	323,216
39	6	4	30	42	4	5	69	339,078
40	6	5	15	23	5	5	56	220,066
41	6	5	23	35	5	5	52	396,633
42	6	5	30	42	5	5	52	104,566
43	6	6	15	23	5	5	56	551,050
44	6	6	23	35	6	6	43	78,366
45	6	6	30	42	6	6	43	21,966

Çizelge 4.5.'te verilen, 6 müşterili test problemleri için ilk amaç fonksiyonuna göre çözümler incelendiğinde bir dron kullanımı ile çıkan 166 dakikalık toplam servis süresinin, altı dron kullanımında toplam 43 dakikaya düştüğü gözlemlenmiştir. Problem boyutu arttıkça dron sayısındaki artışının çözüm sonuçlarına etkisinin arttığı gözlenmiştir. 6 dronun kullanıldığı durumda her müşteriye bir dron gönderilmiş ve kamyon ile sevkiyat yapılmamıştır. Dört dron kullanımına kadar hız ve hıza bağlı uçuş menzilinin etkisi gözlenmezken, 4, 5 ve 6 dron kullanımının amaç fonksiyonuna etkisi görülmüştür. Bu durum problem boyutu arttıkça bu etkinin daha fazla gözleneceği şeklinde yorumlanabilir. 4 ve 5 müşterili test problemlerinin çözüm süreleri ile kıyaslandığında, problemin boyutunun artmasına bağlı olarak çözüm sürelerindeki artış görülmüştür.

Çizelgede 32 numaralı test probleminin servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre çözülmesi sonucu ortaya çıkan rota Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. 32. test probleminin servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası

Şekil 4.6.'da 32. test probleminin ilk amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası verilmiştir. Kalın çizgilerle takip edilen yol, kara aracına ait rotadır. İnce çizgiler ile drona ait rotalar gösterilmiştir. 2 dron kullanıldığından farklı dron rotaları farklı renklerle gösterilmiştir. Kamyon önce Aziziye Eczanesi'ne sonra Zelal Eczanesi'ne giden yolu takip etmekte, sonrasında depoya geri dönmektedir. Birinci dron önce Güneş Ecza Deposu'ndan Okyanus Eczanesi'ne fırlatılmakta, teslimat yaptıktan sonra Aziziye Eczanesi'nde kamyonla buluşmaktadır. Sonrasında Ayperin Eczanesi'ne fırlatılmakta, hizmet verdikten sonra Zelal Eczanesine gitmektedir. İkinci dron depodan Demirkan Eczanesi'ne fırlatılmaktadır. Kamyonla Aziziye Eczanesi'nde buluştuktan sonra Aybek Eczanesi'ne fırlatılmakta ve devamında Zelal Eczanesi'nde kamyon ile buluşmaktadır.

7 müşterili problemlerin çözüm süreleri 6 saati aşmasına rağmen GAMS CPLEX çözücüsü ile herhangi bir çözüme ulaşılamamıştır. Bu nedenle test problemlerinin çözümleri 7 müşterili modele kadar incelenmiştir.

4.2. Toplam Gecikmelerin Enküçüklenmesi Amaç Fonksiyonu İçin Sonuçlar

İkinci amaç fonksiyonu en az gecikmedir. Bu amaç fonksiyonunda her müşteri için belirlenen teslim zamanlarına göre yapılan sevkiyatlardaki gecikmeler incelenmiş ve bu değeler enküçüklenmiştir. Aynı test problemlerinin yine aynı matematiksel model üzerinden GAMS'in CPLEX çözücüsünde en az gecikme amaç fonksiyonuna göre çözümleri incelenmiştir.

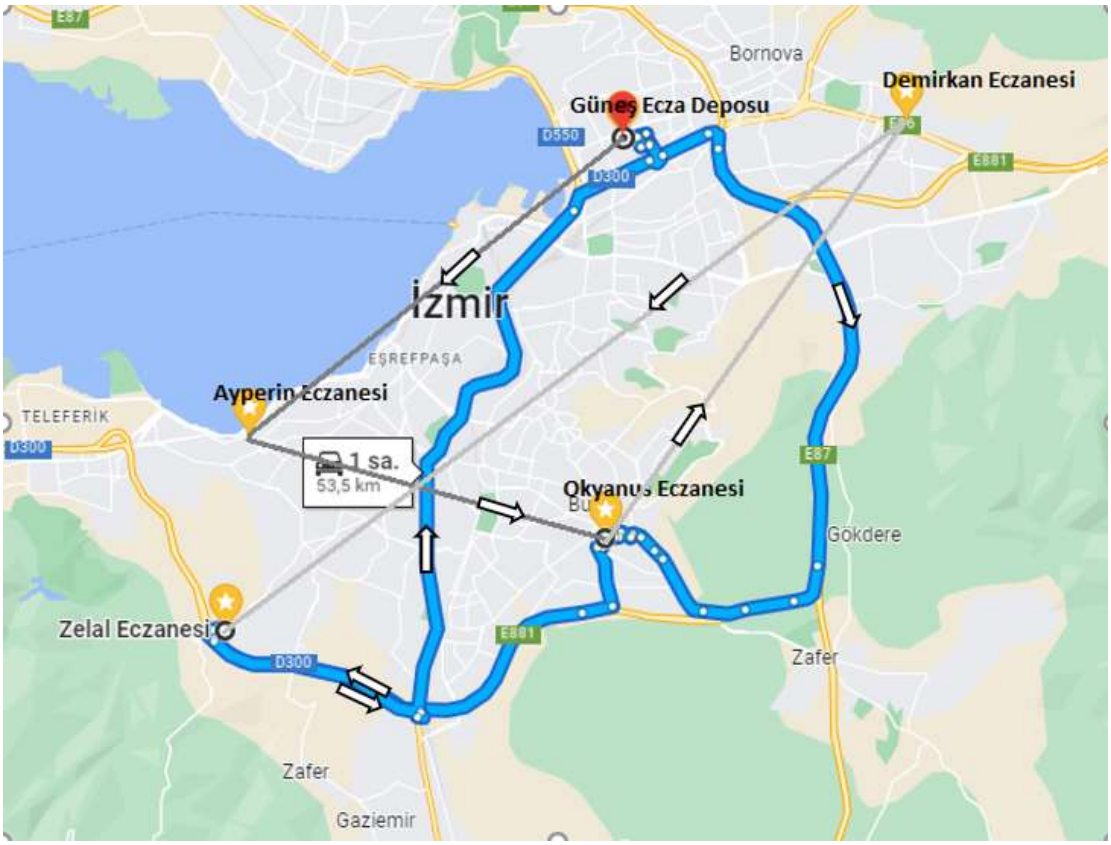
4 müşterili test problemlerinin model sonuçları Çizelge 4.6.'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. 4 müşterili test problemlerinde en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonu için sonuçlar

Test Problemi	Müşteri Sayısı	Dron Sayısı	Hız	Uçuş Menzili	Kullanılan Dron Sayısı	Dron Rotası Sayısı	Amaç Fonksiyonu 2	
							∑Gecikme (dk)	Çözüm Süresi (s)
1	4	1	15	23	1	2	30	5,866
2	4	1	23	35	1	2	30	5,783
3	4	1	30	42	1	2	30	4,466
4	4	2	15	23	2	3	3	2,550
5	4	2	23	35	2	3	3	4,833
6	4	2	30	42	2	3	3	2,633
7	4	3	15	23	3	3	0	4,366
8	4	3	23	35	3	3	0	2,666
9	4	3	30	42	3	3	0	2,500
10	4	4	15	23	4	4	0	2,233
11	4	4	23	35	4	4	0	4,166
12	4	4	30	42	4	4	0	2,166

Çizelge 4.6.'da verilmiş, dört müşterili test problemleri için ikinci amaç fonksiyonuna göre çözümler incelendiğinde bir dron kullanımı ile çıkan 30 dakikalık gecikmenin, üç dron kullanımıyle birlikte sıfıra düştüğü gözlemlenmiştir. Dört dron kullanımında bu sebeple değişiklik olmamış, problem sıfır gecikme ile sonuç vermiştir. Çizelgedan okunduğu gibi dört dron kullanılan durumlarda her müşteriye bir dron gönderilmiştir, kamyon ile sevkiyat yapılmamıştır. Dronlar aktif olarak kullanılmıştır. Bu problemlerde hız ve hıza bağlı oluşan uçuş menzilinin etkisi gözlemlenmemiştir.

3 numaralı test probleminin en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonuna göre çözülmesi sonucu ortaya çıkan rota Şekil 4.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. 3. test probleminin en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası

Şekil 4.7.'de 3. test probleminin ikinci amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası verilmiştir. Kalın çizgilerle takip edilen yol, kara aracına ait rotadır. İnce çizgiler ile drona ait rotalar gösterilmiştir. Kamyon Güneş Ecza Deposu'ndan yola çıkarak ilk olarak Okyanus Eczanesi'ne gitmektedir. Oradan önce Zelal Eczanesi'ne sevkiyat yapıp, sonrasında depoya geri dönmektedir. Dron depodan öncelikle Ayperin Eczanesi'ne fırlatılmakta, sonrasında Okyanus Eczanesi'nde kamyon ile buluşup, oradan Demirkan Eczanesi'ne fırlatılmaktadır. Demirkan Eczanesi'nde hizmet verdikten sonra Zelal Eczanesi'nde kamyon ile buluşmaktadır.

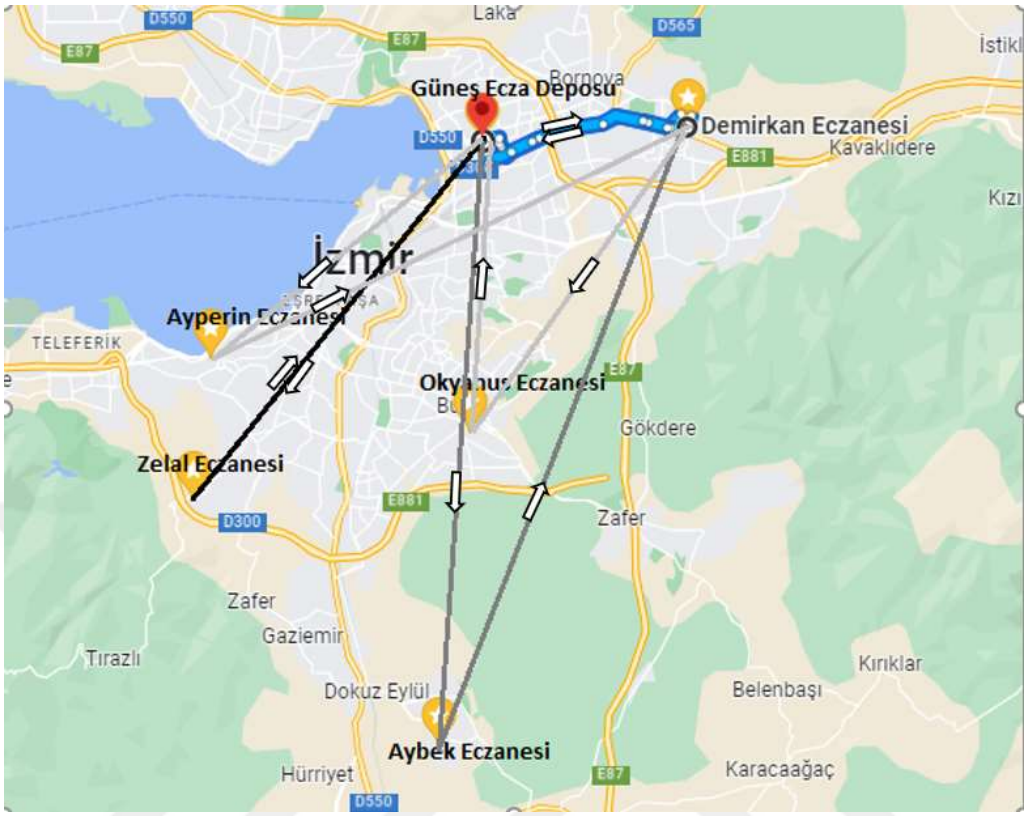
5 müşterili test problemlerinin model sonuçları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. 5 müşterili test problemlerinde en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonu için sonuçlar

Test Problemi	Müşteri Sayısı	Dron Sayısı	Hız	Uçuş Menzili	Kullanılan Dron Sayısı	Dron Rotası Sayısı	Amaç Fonksiyonu 2	
							∑Gecikme (dk)	Çözüm Süresi (s)
13	5	1	15	23	1	3	60	12,100
14	5	1	23	35	1	3	58	9,550
15	5	1	30	42	1	3	58	9,700
16	5	2	15	23	2	4	19	9,300
17	5	2	23	35	2	4	19	15,450
18	5	2	30	42	2	4	19	17,266
19	5	3	15	23	3	4	5	9,683
20	5	3	23	35	3	4	3	12,883
21	5	3	30	42	3	4	3	13,283
22	5	4	15	23	4	4	0	5,916
23	5	4	23	35	4	4	0	3,983
24	5	4	30	42	4	4	0	4,150
25	5	5	15	23	4	4	0	7,250
26	5	5	23	35	5	5	0	4,266
27	5	5	30	42	5	5	0	4,216

Çizelge 4.7.'de verilmiş, 5 müşterili test problemleri için ikinci amaç fonksiyonuna göre çözümler incelendiğinde bir dron kullanımı ile çıkan 60 dakikalık gecikmenin, dört dron kullanımında sıfıra düştüğü gözlemlenmiştir. Beş dron kullanımında bu sebeple değişiklik olmamış, problem sıfır gecikme ile sonuç vermiştir. Beş dronun kullanıldığı durumda her müşteriye bir dron gönderilmiş ve kamyon ile sevkiyat yapılmamıştır. Dronlar aktif olarak kullanılmıştır. İki, dört ve beş kullanımında hız ve hıza bağlı uçuş menzilinin etkisi gözlemlenmezken bir ve üç dronun kullanıldığı durumlarda bu etki gözlemlenmiştir. Dört müşterili test problemlerinde bu etki gözlemlenmezken bu problemlerde gözlemlenmesi, problem büyüklüğü arttıkça bu etkinin daha fazla gözlemleneceği şeklinde yorumlanmıştır. 4 müşterili test problemlerinin çözüm süreleri ile kıyaslandığında, problemin büyüklüğünün artmasına bağlı olarak çözüm sürelerindeki artış gözlemlenmiştir.

20 numaralı test probleminin en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonuna göre çözülmesi sonucu ortaya çıkan rota şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. 20. test probleminin en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası

Şekil 4.8'de 20. test probleminin ikinci amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası verilmiştir. Kalın çizgilerle takip edilen yol, kara aracına ait rotadır. İnce çizgiler ile drona ait rotalar gösterilmiştir. Üç dron kullanıldığından farklı dronlar farklı renklerle gösterilmiştir. Kamyon depodan Demirkan Eczanesi'ne sevkiyat yapmakta ve sonrasında depoya geri dönmektedir. Birinci dron, depodan Ayperin Eczanesi'ne fırlatılmakta, devamında Demirkan Eczanesi'nde kamyonla buluşup Okyanus Eczanesi'ne fırlatılmaktadır. Son olarak buradan depoya geri dönmektedir. İkinci dron, depodan Aybek Eczanesi'ne fırlatılıp hizmet verdikten sonra Demirkan Eczanesi'nde kamyon ile buluşmaktadır. Son olarak üçüncü dron depodan Zelal Eczanesi'ne fırlatılmakta ve hizmet verdikten sonra depoya geri dönmektedir.

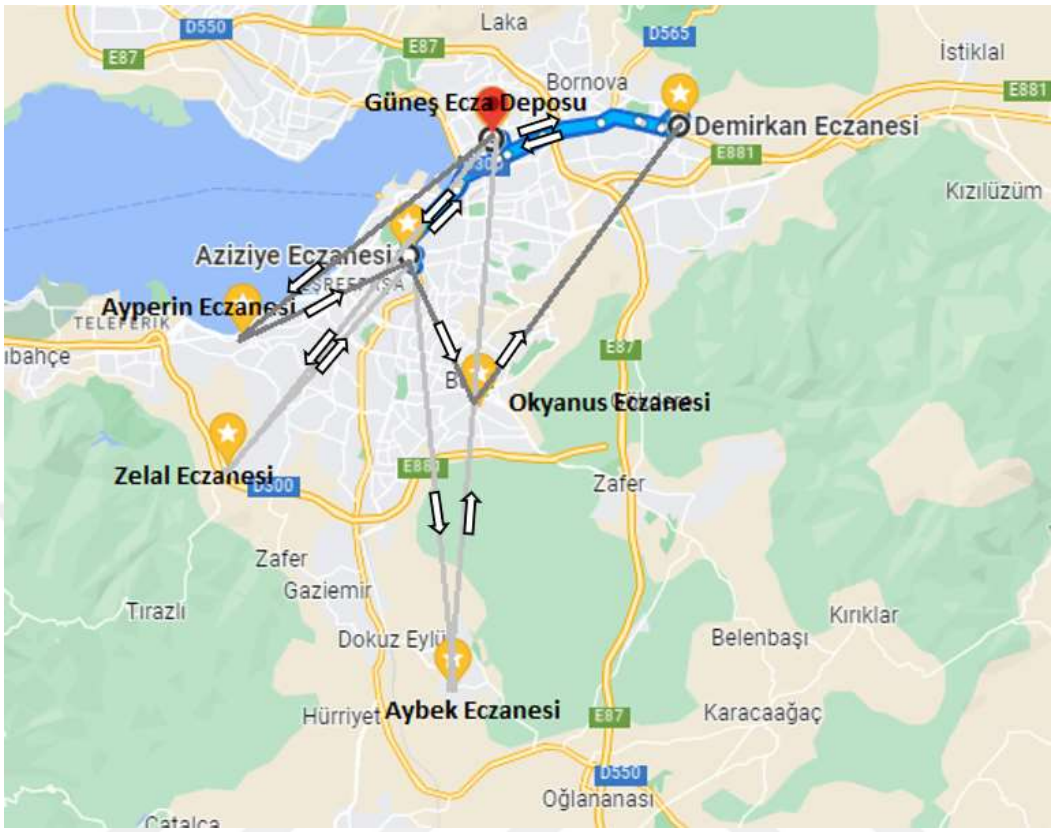
6 müşterili test problemlerinin model sonuçları Çizelge 4.8.'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. 6 müşterili test problemlerinde en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonu için sonuçlar

Test Problemi	Müşteri Sayısı	Dron Sayısı	Hız	Uçuş Menzili	Kullanılan Dron Sayısı	Dron Rotası Sayısı	Amaç Fonksiyonu 2	
							∑Gecikme (dk)	Çözüm Süresi (s)
28	6	1	15	23	1	3	70	55,633
29	6	1	23	35	1	3	70	228,066
30	6	1	30	42	1	3	70	72,044
31	6	2	15	23	2	4	13	65,053
32	6	2	23	35	2	4	13	558,383
33	6	2	30	42	2	4	13	264,483
34	6	3	15	23	3	5	0	9,433
35	6	3	23	35	3	5	0	8,933
36	6	3	30	42	3	5	0	2,092
37	6	4	15	23	4	5	0	12,233
38	6	4	23	35	4	5	0	8,200
39	6	4	30	42	4	5	0	7,166
40	6	5	15	23	5	5	0	7,900
41	6	5	23	35	5	5	0	7,983
42	6	5	30	42	5	5	0	7,583
43	6	6	15	23	5	5	0	10,800
44	6	6	23	35	6	6	0	8,000
45	6	6	30	42	6	6	0	9,783

Çizelge 4.8.'de verilmiş, 6 müşterili test problemleri için ikinci amaç fonksiyonuna göre çözümler incelendiğinde bir dron kullanımı ile çıkan 70 dakikalık gecikmenin, üç dron kullanımıyla sıfıra düştüğü gözlemlenmiştir. Üç dron kullanımından sonra dron sayısı arttırıldığında, bu sebeple değişiklik olmamış, problemler sıfır gecikme ile sonuç vermiştir. Problem büyüklüğü arttıkça dron sayısının artışının çözüm sonuçlarındaki etkisinin büyüdüğü gözlemlenmektedir. Altı dronun kullanıldığı durumda her müşteriye bir dron gönderilmiş ve kamyon ile sevkiyat yapılmamıştır. Dronlar aktif olarak kullanılmıştırBu problemlerde hız ve hıza bağlı oluşan uçuş menzilinin etkisi gözlemlenmemiştir. Bunun sebebi, gecikmelerin sıfıra indirilmesi olarak yorumlanmıştır. Dört ve beş müşterili test problemlerinin çözüm süreleri ile kıyaslandığında, problemin büyüklüğünün artmasına bağlı olarak çözüm sürelerindeki artış gözlemlenmiştir.

32 numaralı test probleminin en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonuna göre çözülmesi sonucu ortaya çıkan rota Şekil 4.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. 32. test probleminin en küçük toplam gecikme amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası

Şekil 4.9.'da 32. test probleminin ikinci amaç fonksiyonuna göre çözümünün rotası verilmiştir. Kalın çizgilerle takip edilen yol, kara aracına ait rotadır. İnce çizgiler ile drona ait rotalar gösterilmiştir. İki dron kullanıldığından farklı dronlar farklı renklerle gösterilmiştir. Kamyon Güneş Ecza Deposu'ndan çıkıp Aziziye Eczanesi'ne gitmektedir, sonrasında Demirkan Eczanesi'nde sevkiyatı tamamlayıp depoya geri dönmektedir. Birinci dron depodan Zelal Eczanesi'ne fırlatmakta ve hizmet verdikten sonra Aziziye Eczanesi'nde kamyonla buluşmaktadır. Sonrasında Aybek Eczanesi'ne fırlatılmakta ve depoya geri dönmektedir. İkinci dron depodan öncelikle Ayperin Eczanesi'ne fırlatılmakta ve Aziziye Eczanesi'nde kamyonla buluşmaktadır. Devamında buradan Okyanus Eczanesi'ne fırlatılmakta ve Demirkan Eczanesi'nde kamyonla buluşmaktadır.

En küçük toplam servis süresi amaç fonksiyonunda olduğu gibi, 7 müşterili modellerin çözüm süreleri altı saati aşmış ve sonuç alınamamıştır. Bu nedenle sonuçlar 6 müşteri ile sınırlandırılmıştır.

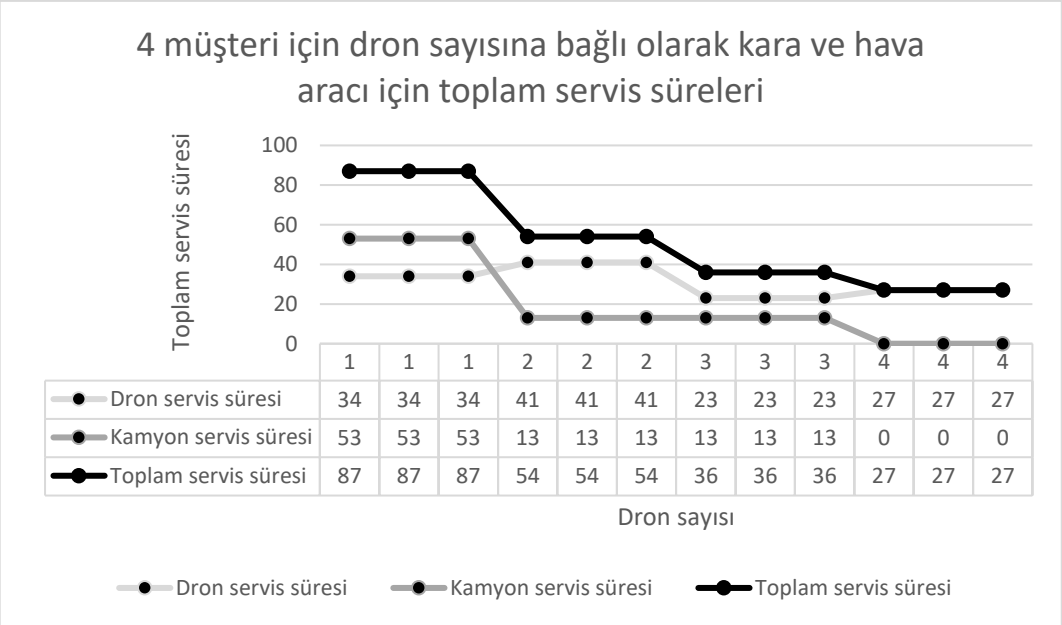
Othman vd. (2017), çalışmasında bir İHA ve bir kamyon ile çok modlu teslimat probleminin NP-zor yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, özellikle problem boyutu büyük olduğunda, kamyon-dron ekip lojistiği problemleri kesin çözüm veren yöntemler kullanarak makul sürede çözülememektedir.

4.3. Ödünleşmeler

4.3.1. Amaç Fonksiyonları Doğrultusunda Ödünleşmeler

4.1 ve 4.2 başlıkları altında tanıtılan, iki amaç fonksiyonu için oluşturulan çözümlere göre müşteri sayısı temelinde dron ve uçuş menziline bağlı servis süresi ve gecikme grafikleri oluşturulmuştur.

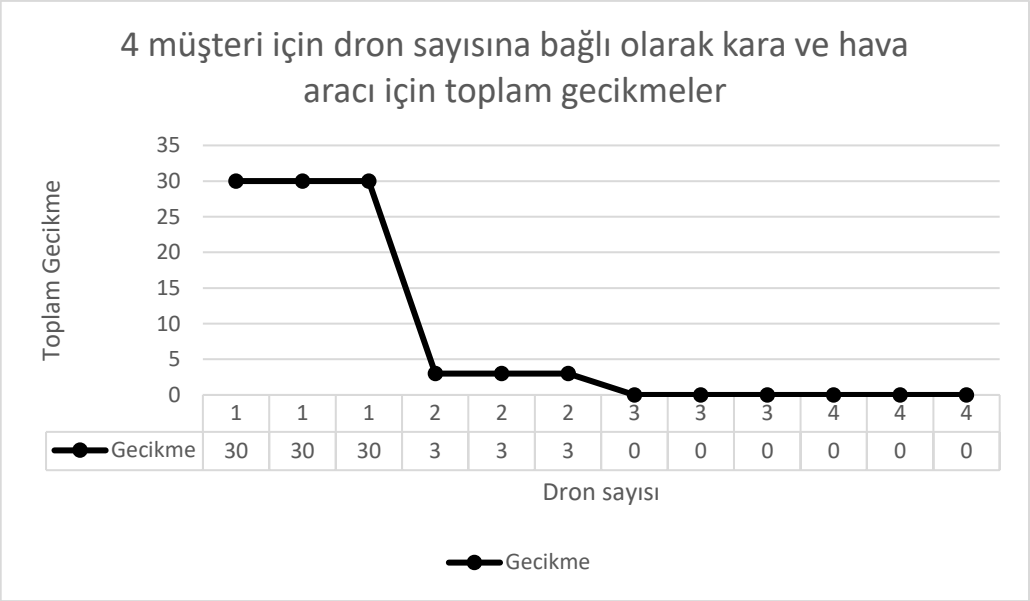
4 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara aracı ve hava aracına ait servis süreleri şekil 4.10.'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.10. 4 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara ve hava aracı için servis süreleri

Şekil 4.10.'daki grafikte dört müşterili test problemlerinin dron sayısına bağlı olarak ilk amaç fonksiyonu olan servis süreleri toplamının enküçüklenmesine göre çözüm sonuçları gösterilmiştir. Kamyon kullanımının azalması ve dron servis sürelerinin artmasına bağlı olarak toplam servis süresinin azaldığı gözlenmektedir. 4 dron kullanımının olduğu durumlarda her müşteriye bir dron gönderimi olduğundan, kamyon ile sevkiyat yapılmamıştır. Bu nedenle toplam servis süresi ile drona ait servis süresi eşitlenmiştir. Grafiğin başında 87 dakika ile başlayan servis süreleri toplamı, dron sayısının artışı ile birlikte toplam 27 dakikaya kadar düşmüştür.

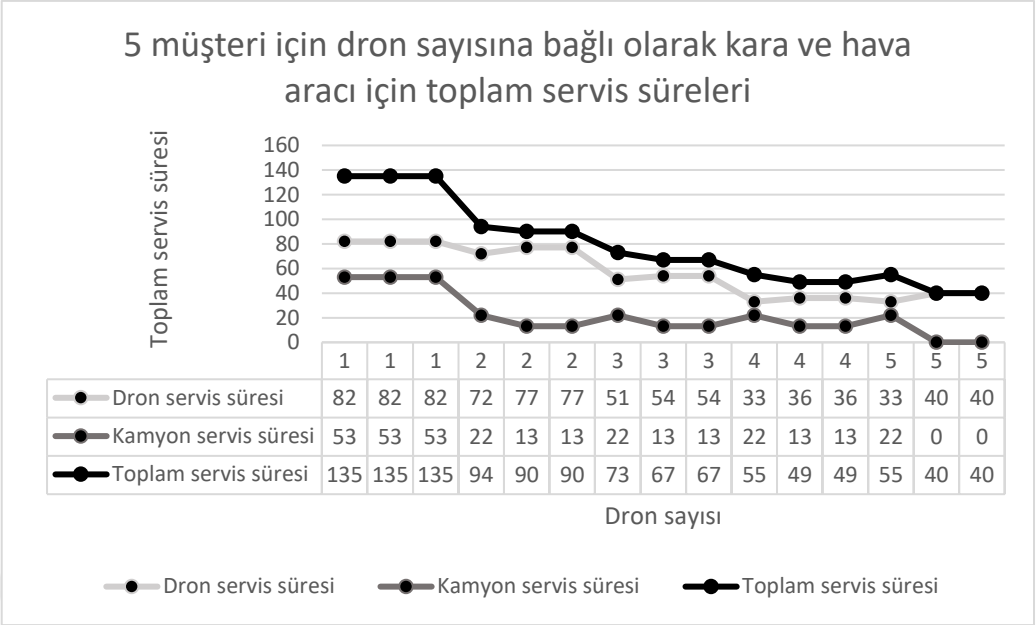
4 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara aracı ve hava aracına ait gecikmeler şekil 4.11'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.11. 4 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara ve hava aracı için gecikmeler

Şekil 4.11'deki grafikte 4 müşterili test problemlerinin dron sayısına bağlı olarak ikinci amaç fonksiyonu olan toplam gecikmenin enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre çözüm sonuçları gösterilmiştir. İlk durumda bir dron kullanımıyla oluşan gecikme toplam 30 dakikadır. Şekilde görüldüğü gibi dron sayısı 3'eve 4'e çıkartıldığında gecikme olmamaktadır. Toplam gecikmelerin enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre, 4 müşteri bazında en iyi dron sayısının üç dron olduğu görülmektedir.

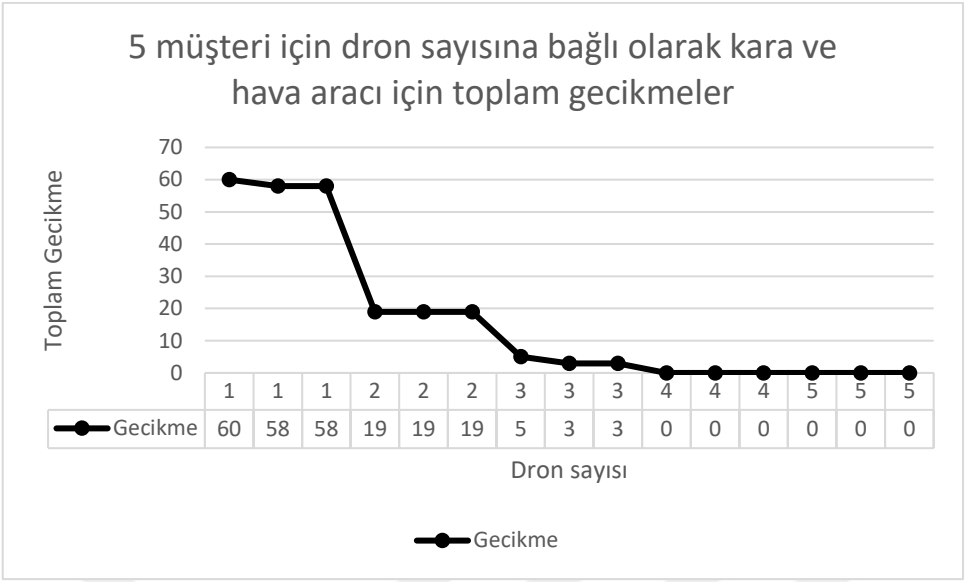
5 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara aracı ve hava aracına ait servis süreleri şekil 4.12'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.12. 5 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara ve hava aracı için servis süreleri

Şekil 4.12'deki grafikte 5 müşterili test problemlerinin dron sayısına bağlı olarak servis sürelerinin toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre çözümleri gösterilmiştir. 4 müşterili problemlerin çözümlerinde olduğu gibi, kamyon kullanımının azalması ve dron servis sürelerinin artmasına bağlı olarak toplam servis süresinin azaldığı gözlenmiştir. 5 dron kullanımının olduğu durumlarda her müşteriye bir dron gönderimi olduğundan, kamyon ile sevkiyat yapılmamıştır. Bu nedenle toplam servis süresi ile drona ait servis süresi eşitlenmiştir. Tek dron kullanıldığı durumda 135 dakika ile başlayan servis süreleri toplamı, dron sayısının artışı ile birlikte 40 dakikaya kadar düşmüştür.

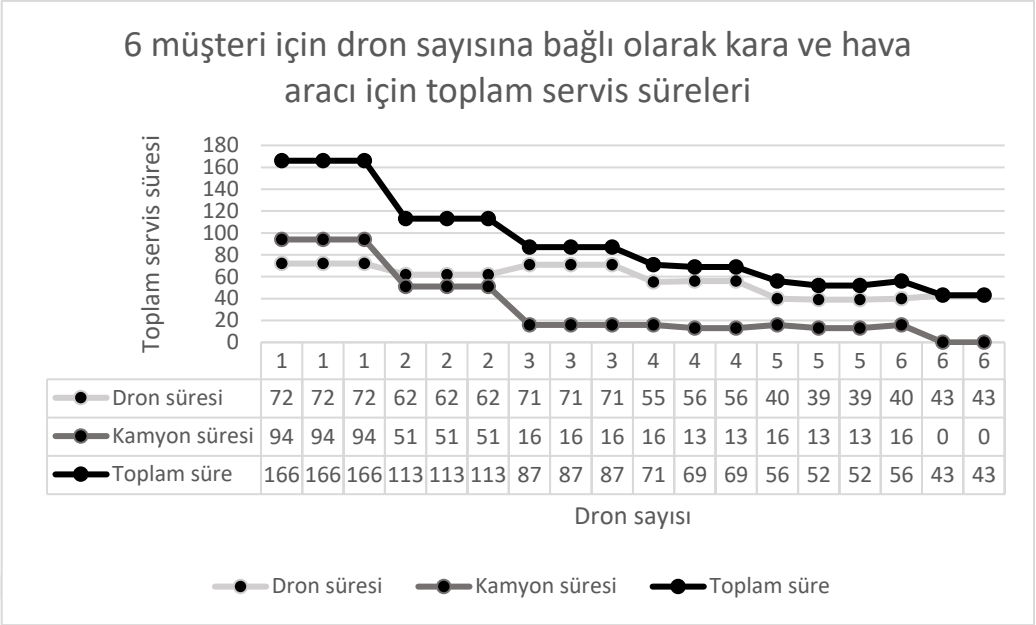
5 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara aracı ve hava aracına ait gecikmeler Şekil 4.13.'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.13. 5 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara ve hava aracı için gecikmeler

Şekil 4.13.'deki grafikte 5 müşterili test problemlerinin dron sayısına bağlı olarak ikinci amaç fonksiyonu olan toplam gecikmelerin enküçüklenmesine göre çözümleri gösterilmiştir. İlk durumda bir dron kullanımıyla oluşan gecikme 60 dakikadır. Şekilde görüldüğü gibi dron sayısı 4'e çıkarıldığında gecikme olmamaktadır. Toplam gecikmenin enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre, 5 müşteri içeren problemde en iyi dron sayısı 4 olarak karşımıza çıkmaktadır.

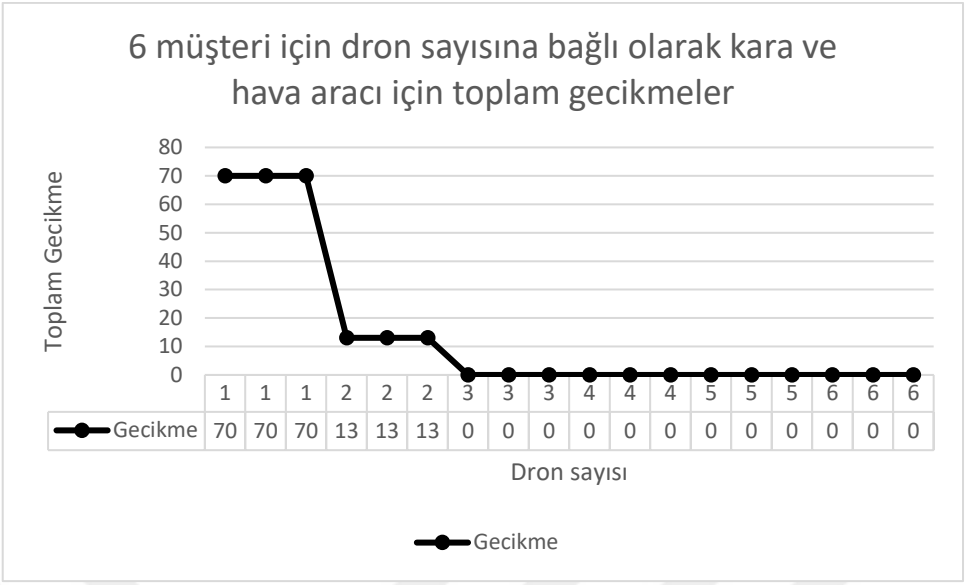
6 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara aracı ve hava aracına ait servis süreleri Şekil 4.14.'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.14. 6 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara ve hava aracı için servis süreleri

Şekil 4.14.'deki grafikte 6 müşterili test problemlerinin dron sayısına bağlı olarak ilk amaç fonksiyonu olan servis süreleri toplamının enküçüklenmesine göre çözümleri gösterilmiştir. 4 ve 5 müşterili problemlerin çözümlerinde olduğu gibi kamyon kullanımının azalması ve dron servis sürelerinin artmasına bağlı olarak toplam servis süresinin azaldığı gözlenmiştir. 6 dron kullanımının olduğu durumlarda her müşteriye bir dron gönderimi olduğundan, kamyon ile sevkiyat yapılmamıştır. Bu nedenle toplam servis süresi ile drona ait servis süresi eşitlenmiştir. Tek dron kullanıldığında toplam 166 dakika ile başlayan toplam servis süresi, dron sayısının artışı ile birlikte toplam 43 dakikaya kadar düşmüştür.

6 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara aracı ve hava aracına ait gecikmeler şekil 4.15.'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.15. 6 müşteri için dron sayısı ve uçuş menziline bağlı olarak kara ve hava aracı için gecikmeler

Şekil 4.15.'deki grafikte 6 müşterili test problemlerinin dron sayısına bağlı olarak ikinci amaç fonksiyonu olan toplam gecikmenin enküçüklenmesine göre çözümleri gösterilmiştir. İlk durumda tek dron kullanımıyla oluşan toplam gecikme 70 dakikadır. Şekilde görüldüğü gibi dron sayısı 3'eçıkarıldığında toplam gecikme sıfıra inmektedir. Enküçüklenen toplam gecikme amaç fonksiyonuna göre, 6 müşteri için en iyi dron sayısı 3 olarak görülmektedir.

Problemin çözümüne yönelik önerilen görev planlamaları için iki farklı amaç fonksiyonu kullanılmıştır: servis süreleri toplamının enküçüklenmesi (Model 1) ve gecikmeler toplamının enküçüklenmesi (Model 2). Bu bölümde bu iki amaç fonksiyonu için oluşan ödünleşmeler tartışılmıştır.

Servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonu, tüm müşterilere en kısa sürede hizmet verip rotanın en kısa süre içerisinde tamamlanmasını ifade eder. Toplam gecikmelerin enküçüklenmesi amacı müşterilerin belirttiği teslim zamanlarına göre gecikmeler toplamının en aza indirilmesini ifade eder. Bu durumda servis süreleri toplamının ve gecikmeler toplamınınele alındığı durumlarda birbirleri ile çelişen sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Müşterilerin teslim zamanlarını aşmamak ve müşteri memnuniyetini

esas alarak teslimatları geciktirmemek için gidilen mesafeden ödün vermek gerekebilir. Aynı şekilde rotanın toplam süresiyle orantılı olarak toplam gidilen mesafenin ve hatta maliyetin düşürülmesi için, müşterilerin hizmeti talep ettikleri zamandan ödün vermek gerekebilir.

Durumun incelenmesi için 45 test probleminin her iki amaç fonksiyonuna göre çözümü gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlara göre çizelge 4.9'da ödünleşme değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.9. Test problemlerinin ödünleşme değerleri çizelgesi

	Müşteri-Dron Sayısı	Hız	Model 1		Model 2		Ödünleşme (dk)		Çözüm Süresi (s)	
			∑Servis Süresi	∑Gecikme	∑Gecikme	∑Servis Süresi	Servis Süresi	Gecikme	Servis Süresi	Gecikme
1	4-1	15	87	43	30	104	17	13	6,433	5,866
2	4-1	23	87	43	30	104	17	13	10,050	5,783
3	4-1	30	87	43	30	104	17	13	10,233	4,466
4	4-2	15	54	14	3	58	4	11	1,033	2,550
5	4-2	23	54	14	3	58	4	11	6,000	4,833
6	4-2	30	54	14	3	58	4	11	7,950	2,633
7	4-3	15	36	0	0	36	0	0	4,200	4,366
8	4-3	23	36	0	0	43	7	0	6,133	2,666
9	4-3	30	36	0	0	43	7	0	6,383	2,500
10	4-4	15	27	0	0	27	0	0	3,800	2,233
11	4-4	23	27	0	0	27	0	0	4,000	4,166
12	4-4	30	27	0	0	27	0	0	5,850	2,166
13	5-1	15	135	71	60	153	18	11	15,533	12,100
14	5-1	23	135	71	58	155	20	13	15,116	9,550
15	5-1	30	135	71	58	155	20	13	8,800	9,700
16	5-2	15	94	39	19	108	14	20	17,816	9,300
17	5-2	23	90	29	19	108	18	10	23,116	15,450
18	5-2	30	90	29	19	108	18	10	34,566	17,266
19	5-3	15	73	25	5	87	14	20	19,433	9,683
20	5-3	23	67	11	3	71	4	8	29,066	12,883
21	5-3	30	67	11	3	71	4	8	24,450	13,283
22	5-4	15	55	12	0	56	1	12	18,000	5,916
23	5-4	23	49	0	0	49	0	0	3,200	3,983
24	5-4	30	49	0	0	49	0	0	4,250	4,150

Çizelge 4.9. Test problemlerinin ödünleşme değerleri çizelgesi (devam)

	Müşteri-Dron Sayısı	Hız	Model 1		Model 2		Ödünleşme (dk)		Çözüm Süresi (s)	
			∑Servis Süresi	∑Gecikme	∑Gecikme	∑Servis Süresi	Servis Süresi	Gecikme	Servis Süresi	Gecikme
25	5-5	15	55	12	0	56	1	12	18,035	7,250
26	5-5	23	40	0	0	40	0	0	12,666	4,266
27	5-5	30	40	0	0	40	0	0	4,350	4,216
28	6-1	15	166	78	70	185	19	8	294,566	55,633
29	6-1	23	166	78	70	185	19	8	91,034	228,066
30	6-1	30	166	78	70	185	19	8	44,733	72,044
31	6-2	15	113	42	13	119	6	29	289,900	65,053
32	6-2	23	113	42	13	119	6	29	192,833	558,383
33	6-2	30	113	42	13	119	6	29	284,533	264,483
34	6-3	15	87	19	0	95	8	19	308,516	9,433
35	6-3	23	87	19	0	95	8	19	345,900	8,933
36	6-3	30	87	19	0	95	8	19	337,883	2,092
37	6-4	15	71	10	0	87	16	10	312,300	12,233
38	6-4	23	69	10	0	81	12	10	323,216	8,200
39	6-4	30	69	10	0	98	29	10	339,078	7,166
40	6-5	15	56	0	0	56	0	0	220,066	7,900
41	6-5	23	52	0	0	59	7	0	396,633	7,983
42	6-5	30	52	0	0	59	7	0	104,566	7,583
43	6-6	15	56	0	0	56	0	0	551,050	10,800
44	6-6	23	43	0	0	43	0	0	78,366	8,000
45	6-6	30	43	0	0	43	0	0	21,966	9,783

Çizelge 4.9.'da görüldüğü gibi, Model 1'e ilişkin ilk sütunda, ilk amaç fonksiyonu olan servis süreleri toplamının enküçüklendiği model için sonuçlar verilmektedir. Model 1'in ikinci sütununda servis süreleri toplamının enküçüklendiği çözüm için oluşan toplam gecikme verilmiştir. Model 2'ye ilişkin sütunlarda da benzer şekilde, ilk sütun ilgili amaç fonksiyonu doğrultusunda bulunan çözümün değeri olup, ikinci sütunda ilgili çözümün diğer amaç fonksiyonu değeri verilmiştir. Ödünleşme sütununda ise her iki model sonuçlarına ilişkin ödünleşmeler gösterilmiştir.

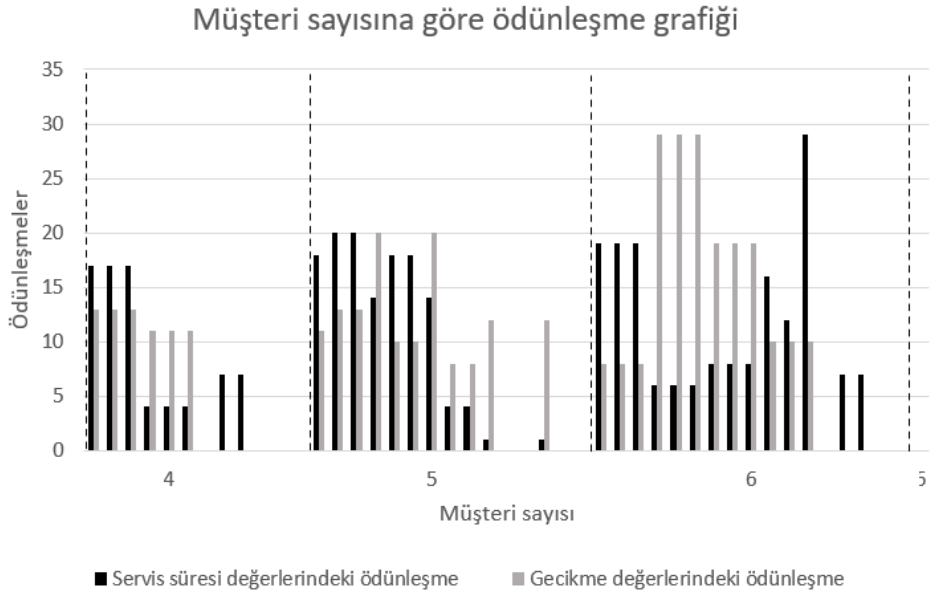
Müşteri bazında incelendiğinde, en büyük ödünleşmelerin küçük dron sayılarında oluştuğu görülmektedir. Dron sayıları arttıkça, amaç fonksiyonu değerlerinde azalma görülmekte, ödünleşmelerdeki farklılık azalmaktadır.

4 müşteri için tek dronlu problemlerde ilk amaç fonksiyonuna göre çözümde toplam servis süresi 87 dakika iken, aynı problemin ikinci amaç fonksiyonu için toplam servis süresi 104 dakika çıkmıştır. Arada 17 dakikalık bir ödünleşme görülmektedir. Aynı durumlarda oluşan 43 dakikalık toplam gecikme ise ikinci amaç fonksiyonuna göre çözüm yapıldığında 30 dakikaya düşmüştür. Burada da 13 dakikalık bir ödünleşme söz konusudur.4 müşterili problemlerde üç dron sayısı ile gecikme sıfıra indirildiğinden üç ve dört dronlu durumlarda herhangi bir gecikme oluşmamış, dolayısıyla gecikme açısından bir ödünleşme çıkmamıştır.

5 müşteri için tek dron kullanımda toplam servis süresi 135 dakikadan 153 dakikaya yükseldiği için 18 dakikalık bir ödünleşme oluşurken, toplam gecikme için 60 dakikadan 71 dakikaya yükselmesi ile 11 dakikalık bir ödünleşme oluşmuştur. Diğer müşteri sayılarında olduğu gibi, ödünleşmelerdeki fark, dron sayısı arttıkça azalmaktadır. 4 dronun kullanıldığı durumlarda gecikme sıfıra indiğindan bu problemlerde gecikmelerde ödünleşme gözlenmemiştir.

6 müşterili problemlerde karşılaşılan ödünleşmeler, diğer müşteri sayılarına kıyasla daha dalgalıdır. Toplam servis süresi için 19 dakika ile başlayan sonuçlar 3 dronlu problemlerde azalarak seyretmiştir. 4 dronun kullanıldığı durumlarda tekrar yüksek ödünleşme gözlenmiştir. 5 ve 6 dronlu problemlerde ödünleşme sıfıra kadar inmiştir. Gecikme için ödünleşmeler incelendiğinde 2 dronlu problemlerde yüksek ödünleşme ile karşılaşılmıştır. 5 dronlu modellerde gecikmenin sıfıra inmesi ile birlikte gecikmelerde ödünleşme gözlemlenmemiştir.

Şekil 4.16’da müşteri sayıları temelinde servis süreleri toplamı ve toplam gecikmeler için ödünleşmelere ait grafik verilmiştir.



Şekil 4.16. Müşteri sayılarına bağlı olarak ödünleşme grafiği

Çizelge 4.16'da verilmiş müşteri sayılarına bağlı ödünleşme grafiği incelendiğinde her müşteri sayıları temelinde ödünleşmelerde farkın müşteri sayısı arttıkça arttığı gözlenmiştir. Problem boyutu büyüdükçe ödünleşme değerlerinin de arttığı söylenebilir.

Grafik müşteri bazında incelendiğinde amaç fonksiyonu doğrultusunda en iyi dron sayısına bağlı olarak ödünleşmelerin farklılık gösterdiği dikkat çekmektedir. Dron sayılarının en fazla olduğu durumlarda ödünleşmeler sıfıra düşmüştür.

4.3.2. Çevreci Rotalama Açısından Ödünleşmeler

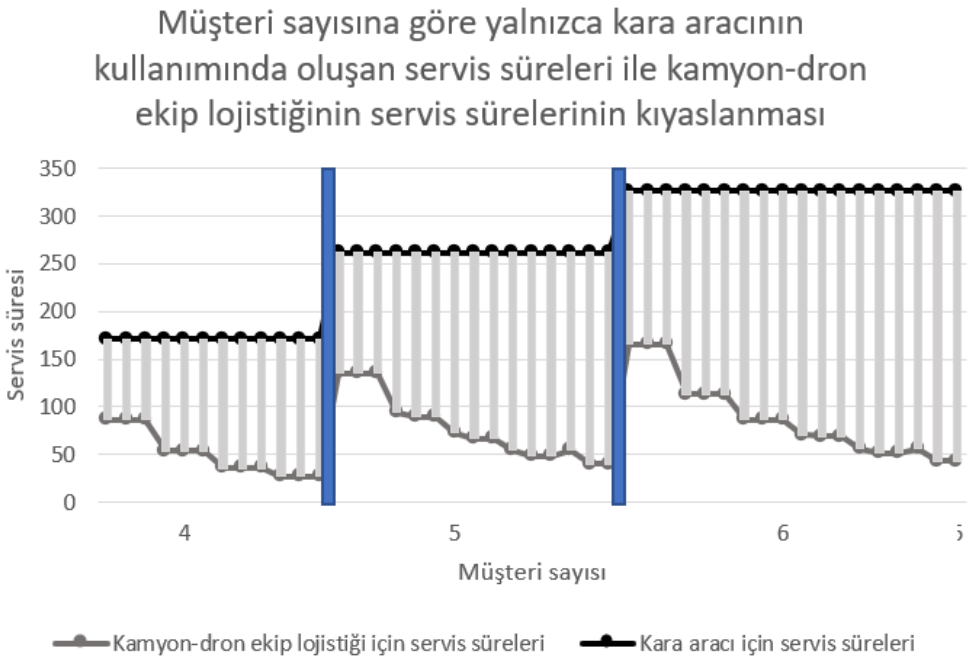
Ek bir durum olarak kurulan modellerin çevreciliğinin incelenmesi için yalnızca kara aracının kullanıldığı durumlar da incelenmiştir. Müşteri sayıları ve uzaklıklar aynı kalırken, test problemlerinde sadece kamyon ile teslimat yapılmıştır.

Eğer sevkiyatlar yalnızca kamyon ile yapılsaydı aynı test problemleri için her iki amaç fonksiyonuna göre çıkacak sonuçlar çizelge 4.10'daki gibi olacaktır.

Çizelge 4.10. Sadece kamyon kullanılarak yapılan teslimatlar için çözüm çizelgesi

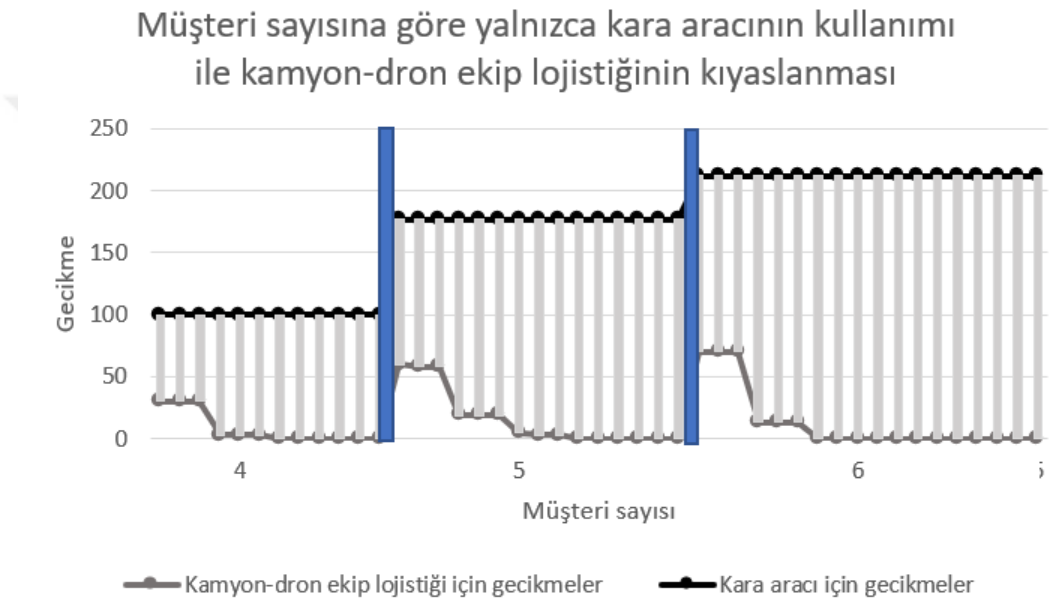
Test Problemleri	Müşteri Sayısı	∑Servis Süresi (dk)	∑Gecikme (dk)
1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12	4	171	100
13-14-15-16-17-18-19-20-21-22-23-24-25-26-27	5	262	177
28-29-30-31-32-33-34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-45	6	326	212

Şekil 4.17'de servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre kamyonla yapılan teslimatların,kamyon dron-ekip lojistiğine göre karşılaştırma grafiği, şekil 4.18'de toplam gecikmelerin enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre sadece kamyonla yapılan sevkiyatların kamyon dron-ekip lojistiğine göre karşılaştırma grafiği verilmiştir.



Şekil 4.17. Servis süreleri toplamının enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna göre sadece kamyon ile yapılan sevkiyatların kamyon-dron ekip lojistiği ile kıyaslanması

Şekil 4.17'de verilen ilk amaç fonksiyonu servis süreleri toplamının enküçüklenmesine göre kara aracı ve kamyon-dron ekip lojistiğinin kıyaslanması grafiği müşteri bazında incelendiğinde, dron sayıları arttıkça aradaki farkın açıldığı gözlemlenmektedir. Kamyon-ekip lojistiğinde dron sayısı arttıkça toplam servis sürelerinde oluşan iyileşme aradaki farkın artmasına sebep olmaktadır. Kara aracının kullanımında oluşan yüksek servis süresi değerleri, karbon salınımındaki yüksek değerler anlamına gelmektedir. Bu durum kamyon-dron ekip lojistiğinin çevreci yaklaşımının avantajını göstermektedir.

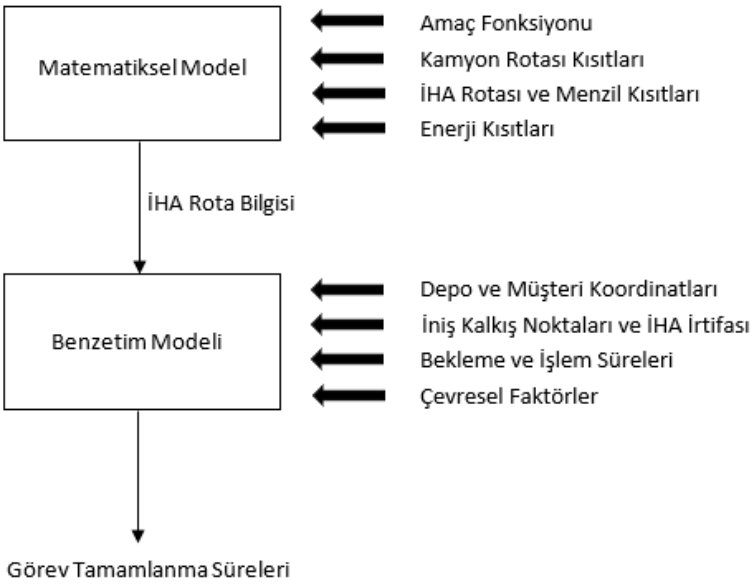


Şekil 4.18. En küçük toplam gecikme amaç fonksiyonuna göre yalnızca kara aracı ile yapılan sevkiyatların kamyon-dron ekip lojistiği ile kıyaslanması

Şekil 4.18.'de verilen ikinci amaç fonksiyonu toplam gecikmelerin enküçüklenmesine göre kara aracı ve kamyon-dron ekip lojistiğinin kıyaslaması grafiği müşteri bazında incelendiğinde, dron sayıları arttıkça gecikmelerde farkın açıldığı gözlenmiştir. Kamyon-dron ekip lojistiği için oluşan gecikmelerin sıfıra inmesiyle birlikte grafik çizgisi sabit kalmakta ve aralarındaki fark korunmaktadır. Kamyon-dron ekip lojistiğinde gecikmelerin en iyi değer olan sıfıra indiği gözlenirken yalnızca kara aracı kullanılan durumlarda bu durum gözlenmemiştir. Bu durum, ilgili test problemleri için sadece kamyon ile teslimat yapıldığında gecikmelerin söz konusu olacağını ifade eder.

4.4. Benzetim Çalışmaları

Yapılan çalışma kapsamında matematiksel modelden alınan sonuçlar (İnsansız Hava Aracına-İHA ilişkin rotalar) benzetim ortamında test edilmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Benzetim modeli girdi ve çıktıları

Amaç fonksiyonu, kamyon ve İHA'ya ait rotalama kısıtları, seyahat süreleri, müşteri ve İHA sayıları, müşterilere varış ve müşterilerden ayrılma zamanları, teslimat zamanları, işlem süreleri, müşteri gecikmeleri, uçuş menzili kısıtları, enerji kısıtları, matematiksel modelin girdileridir. Matematiksel model çalıştırıldığında kamyon ve İHA'ya ait rotalar elde edilmektedir.

Matematiksel model sonucunda elde edilen İHA'lara ilişkin rotalar, benzetim modelinde kullanılmaktadır. Depo ve müşteri koordinatları, iniş ve kalkış noktaları, dron uçuş yüksekliği (irtifa), İHA'nın bekleme ve işlem süreleri ve çevresel faktörler benzetim modelinin girdileridir. Benzetim modeli çalıştırılarak müşterilere ilişkin görev tamamlanma süreleri elde edilmektedir.

Benzetin ortamı olarak İzmir ilinde bir bölge ele alınmıştır. Depo olarak bir ecza deposu belirlenmiştir ve hizmet verdiği eczaneler müşteriler olarak atanmıştır. Matematiksel modelin vermiş olduğu dron rotaları Mission Planner 1.3.77 benzetim yazılımı kullanılarak test edilmiştir.

Tezde tekrar olmaması açısından ikinci test problemi için benzetim çalışmaları örneklenmiştir. Bu test probleminde 4 müşteri, 1 dron bulunmaktadır. Hız, matematiksel modelde ortalama 23 m/s olarak alınmıştır. Ancak benzetim sırasında hız, çevresel ve teknik özellikler sebebiyle değişiklik gösterebilmektedir. Bu test problemine ait rota 3. test problemi ile benzerlik göstermektedir. Şekil 4.4'de verilmiş olan rota benzetim çalışmasında kullanılmıştır.

Şekil 4.20'de Mission Planner yazılımının görev planlaması modülünde İHA'nın kalkış yapması, uçması, teslimat yapması ve iniş yapması için gerekli komut ve koordinatlar gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Benzetim ortamındaki görev planı ekranı

Şekil 4.20.'de yazılımın "Plan" modülünün görüntüsü verilmiştir. Bu arayüzde öncelikle depo olarak bir başlangıç noktası (Güneş Ecza Deposu) koordinatları ile girilmektedir. Başlangıç noktası için "Takeoff" komutu verilmektedir. İHA'nın kalkış yapabilmesi için uçuş yüksekliği (irtifa) değeri girilmektedir. Daha sonra uğrayacağı düğümler için "Waypoint" komutu kullanılmaktadır. Her bir müşterinin koordinatı ve uçuş irtifa değeri girilmektedir. İlk olarak ilk müşteri olan Okyanus Eczanesi'nin koordinatları ve bu müşteriye teslimat yapılacağı için işlem süresi verilmektedir. İHA, kamyon ile Demirkan Eczanesi'nde buluşmaktadır. Buluşmanın sağlanabilmesi için "Waypoint" komutu ile bu eczanenin koordinatları girilmektedir. Teslimat yapılacak nokta olan Ayperin Eczanesi'nin koordinatları yeni bir "Waypoint" komutuna girilmektedir. Son olarak İHA, Zelal Eczanesi'nde kamyon ile buluşmaktadır. Bu eczanenin koordinatları "Waypoint" komutuyla girilmektedir. Sonrasında "Land" komutu ile İHA'nın iniş yapması ve kamyon ile buluşması sağlanmaktadır. Rotanın devamında İHA, kamyon ile birlikte seyahat ederek depoya geri dönmektedir.

Görev planı yüklendikten sonra benzetim çalıştırılmaktadır. Şekil 4.21'de benzetim ekranının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.21. Benzetim ekran görüntüsü

Şekil 4.21. Mission Planner yazılımının benzetim ortamını göstermektedir. Sağ kısımda iki boyutlu İHA benzetimi görülmektedir. Sol kısımda ise benzetime ait güncel veriler ve komutlar yer almaktadır. Uçuş yüksekliği ve dron hızı çevresel faktörlerden etkilendiği için benzetim boyunca farklı değerler alabilmektedir. Depo koordinatlarından çıkış yapan dron, görev planında yüklenen rotayı takip ederek hem teslimatları gerçekleştirmekte, hem de kamyonla buluşarak rotasına devam etmektedir. Şekil 4.4'de verilen rota ile de tutarlı olarak, öncelikle depodan Okyanus Eczanesi'ne yönelerek ilk teslimatı gerçekleştirmektedir. Sonrasında Demirkan Eczanesi'nde kamyon ile buluşmaktadır. Daha sonra buradan Ayperin Eczanesi'ne yol almaktadır. Burada teslimat yaptıktan sonra Zelal Eczanesi'ne gitmekte ve bu düğümde kamyon ile buluşmaktadır. Rotanın geri kalanına kamyon üzerinde devam etmekte ve kamyon ile birlikte depoya geri dönmektedir.

Benzetim kısmında matematiksel modelin verdiği rota benzetim yazılımında girdi olarak kullanılmıştır. Matematiksel modelde elde edilen servis sürelerinin benzetim ortamında test edilmesi sağlanmıştır. Benzetim çalışması sonucunda elde edilen çıktılar, matematiksel modelden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmış ve tutarlı bulunmuştur. Matematiksel modele ait çıktılar ve benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlar Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Matematiksel model ve benzetim modeli sonuçları

Müşteri	**Görev Tamamlanma Süreleri**	
	Matematiksel Modele Ait Varış Süreleri (dk)	Benzetim Modeline Ait Varış Süreleri (dk)
(4) Okyanus Eczanesi	6,00	8,25
(2) Ayperin Eczanesi	28,00	34,45
Amaç Fonksiyonu	34,00	42,70
Toplam Rota Süresi	33,00	42,47

Çizelge 4.11'de matematiksel modelden elde edilen sonuçların benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlar ile kıyaslaması verilmiştir. Test problemi olarak Çizelge 4.3'de verilmiş olan 2. Test problemi ele alınmıştır. Şekil 4.4'de verilmiş olan rota test edilmiştir. İHA rotasının kamyondan fırlatılma, müşteriye teslimat ve kamyonla

buluşma olmak üzere üç düğümden oluştuğu kabul edildiğinde, belirtilen test probleminde İHA, 2 farklı müşteriye hizmet vermektedir. Matematiksel modelden çıkan sonuca göre İHA tarafından ilk olarak Okyanus Eczanesi'ne hizmet verilmekte, daha sonra Ayperin Eczanesi'ne hizmet verilmektedir. Matematiksel modelde alınan varsayımlara göre varış süreleri sırasıyla 6 ve 28 dakikadır. Benzetim çalışması sonucunda aynı eczanelere varış süreleri 8,25 ve 34,45 dk olarak elde edilmiştir. Toplam servis sürelerinin enküçüklenmesi amaç fonksiyonu matematiksel modelde 34 dk iken benzetim modelinde 42,70 dk dır. İHA'nın toplam rota süresi matematiksel modele göre 33 dk olurken, benzetim modelinde toplamda 42, 47 dk sürede rota tamamlanmıştır.

Sonuçlar kıyaslandığında matematiksel model çözüm sonuçları ile benzetim modeli sonuçlarının birbiri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Matematiksel model sonucunda elde edilen görev tamamlanma sürelerinin daha düşük olmasının sebebi modelin varsayımlarından kaynaklanmalıdır. Matematiksel modelde İHA'lar için ortalama hız kullanılmaktadır. Benzetim modelinde ise İHA'nın uçuşu sırasında farklı zamanlardaki hız, açılar, uçuş yüksekliği vs. dikkate alınmaktadır. Hız ve yükseklik rota süresince değişkenlik göstermektedir. Ayrıca belli noktalarda uçuş yüksekliği arttıkça İHA hızı düşmektedir. Sonuç olarak matematiksel modelden çıkan sonuçlar benzetim ortamında test edildiğinde tutarlılığı bozmayacak şekilde bir fark meydana gelmektedir.

Matematiksel modelde çevresel faktörler enerji üzerinde etkili olsa da, matematiksel modelde İHA'ya ilişkin parametreler sabit bir değer olarak alınmıştır. Oysa ki bu parametreler çevresel ve teknik kısıtlar gereği zamana göre değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla benzetim modeli bunları dikkate aldığından aradaki farklar oluşmuştur. Bu kapsamda gerçeğe yakın varış süreleri bilgisi için karar vericinin benzetim modeli sonuçlarını da dikkate alması gerekmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kamyon-dron ekip lojistiğine ilişkin tek kamyon çok dron görev planlama problemi ele alınmıştır. Problemin çözümüne yönelik, literatürde çevre ve enerji konularında belirlenen ihtiyaca karşılık verecek karma tamsayılı doğrusal bir karar modeli önerilmiştir. Moshref-Javadi vd.'nin (2019), tek kamyon çok dron ekip lojistiği üzerine yaptıkları çalışma temel alınarak modele, literatürden farklı olarak iki farklı amaç fonksiyonu eklenmiştir. İlgili amaç fonksiyonları; servis süreleri toplamının enküçüklenmesi ve gecikmeler toplamının enküçüklenmesidir. Bu iki amaç fonksiyonu ile servis süreleri toplamının enküçüklenmesi, dolayısıyla gidilen yolun ve maliyetin en aza indirilmesi ve müşterilerin teslim zamanlarına göre toplam gecikmelerin enküçüklenmesine bağlı olarak müşteri memnuniyetinin arttırılması hedeflenmiştir. Böylece, modelin verdiği çözümler lojistik alanında hem maliyet hem de müşteri memnuniyeti açısından değerlendirmeye açıktır. Tez kapsamında bu amaç fonksiyonlarındaki ödünleşmeler de tartışılmıştır. Modelin çevre üzerindeki olumlu etkilerinin vurgulanması için sonuçlar, yalnızca kara aracının kullanıldığı durumlar ile kıyaslanmış ve ödünleşmeleri incelenmiştir. Aynı motivasyon ile modele enerji kısıtlamaları dahil edilmiş, insansız hava aracının özellikleri, kısıtları, çevresel koşulların etkisi de dikkate alınmıştır. Dronların enerji formülasyonu ve bu formülasyona bağlı olarak uçuş menzillerinin hesabı yapılmıştır. Son olarak matematiksel modelden elde edilen verilerin benzetim ortasında testi sağlanmıştır ve çıkan sonuçlar matematiksel modelden çıkan sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

Literatürde probleme ilişkin test problemleri mevcut olmadığından harita üzerinde İzmir bölgesinden alınan gerçek uzaklık verileri ile bir veri seti türetilmiştir. Depo olarak İzmir bölgesindeki bir ecza deposu ve müşteri olarak aynı bölgedeki eczaneler belirlenmiştir. Harita üzerinde belirlenen düğümler kamyon ve dronun özelliklerine göre ayrı olarak incelenmiştir. Enerji formülasyonu için yine gerçek hayat verileri ile tutarlı, hız ve uçuş menzili verileri hesaplanmıştır. Bu sayede gerçek hayat problemleri ile tutarlı bir veri seti literatüre sunulmuştur.

İki amaç fonksiyonu ile elde edilen sonuçlar analiz edilmiş ve ödünleşmeler ortaya konulmuştur. Müşteri ve dron sayısındaki değişim amaç fonksiyonlarının sonuçlarına etki ederken, dron hızı ve uçuş menzilindeki değişimin küçük boyutlu problemlerde etkili olmadığı görülmüştür. Hıza bağlı olarak uçuş menzillerinin artması ile, kullanılan dron sayısında artış gözlenmiştir. Kamyonlarla yapılan sevkiyatların azalmasıyla dronların servis sürelerinde meydana gelen artış, toplam servis sürelerinde azalmasıyla sonuçlanmıştır. Problem boyutu arttıkça, dron sayılarındaki artışın amaç fonksiyonlarına yaptığı iyileştirmeler de artmaktadır. Yine aynı sebepten dolayı, problem boyutu arttıkça iki amaç fonksiyonu arasındaki ödünleşmelerde farkın arttığı görülmüştür. Ancak müşteri bazında incelendiğinde, dron sayısı arttıkça ödünleşmelerdeki fark azalmıştır. Bunun sebebi en iyi dron sayısından daha fazla dron kullanımıdır. Yalnızca kara aracının kullanıldığı durumların, kamyon-dron ekip lojistiği ile kıyaslanması sonucunda modelin çevreci yaklaşımı vurgulanmaktadır. Müşteri bazında yapılan incelemelerde, dron sayıları arttıkça kamyon-dron görev planlamasına ait verilerin amaç fonksiyonunda verdiği sonuçlar ile kamyonun verdiği sonuçlar arasındaki fark açılmaktadır. Kullanılan dron sayısı arttıkça modelin çevreci özelliği de artmaktadır. Model sonuçları kapsamında, karbon emisyonu kullanımında %80'lere varan iyileştirme gözlenmiştir.

Ele alınan problem NP-zor yapıya sahiptir. 7 müşterili problemlerde GAMS çözücüsü ile makul sürede çözüm alınamamıştır. Gelecekteki çalışmalarda yapay zeka optimizasyon algoritmalarından meta-sezgiseller kullanılabilir. Türetilen verilerdeki dronun teknik özellikleri, çevre koşulları, hatta farklı dronların enerjileri ve maksimum enerji değerleri, yeni durumlara uyarlanabilir ve model farklı test problemleri için de kullanılabilir. Çalışmada statik bir model üzerinde analiz yapılmıştır. Dinamik yapıda bir model kurulabilir. Kamyon ve dronun buluşma noktalarının düğümler ile sınırlanmadığı ve herhangi bir noktada buluşabildikleri esnek bir sistem tasarlanabilir. Böylece buluşma noktalarındaki bekleme süreleri ortadan kaldırılabilecektir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Agardi, A., Kovacs, L., Banyai, T., 2020, Vehicle routing in drone-based package delivery services. In: J.K.V.K. Szita T´othn´e, K., (Ed.), Solutions for Sustainable Development - 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development, CRC Press, London, pp. 151–1597.

Agatz, N., Bouman, P., Schmidt, M., 2018, Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. Transp. Sci. 52 (4), 965–981.

Akram, R.N., Markantonakis, K., Mayes, K., Habachi, O., Sauveron, D., Steyven, A., Chaumette, S., 2017, Security, privacy and safety evaluation of dynamic and static fleets of drones. In: Digital Avionics Systems Conference (DASC). IEEE, pp. 1–12.

Bretzke W-R., (2013), Global urbanization: a major challenge for logistics. Logist Res 6:57–62

Boucher, P., 2016, You wouldn't have your granny using them: drawing boundaries between acceptable and unacceptable applications of civil drones. Sci. Eng. Ethics 22 (5), 1391–1418.

Bouman, P., Agatz, N., & Schmidt, M., (2018), Dynamic programming approaches for the traveling salesman problem with drone. Networks, 72(4), 528-542. doi:10.1002/net.21864

Boysen, N., Fedtke, S., & Schwerdfeger, S., (2020), Last-mile delivery concepts: a survey from an operational research perspective. OR Spectrum, 43(1), 1-58. doi:10.1007/s00291-020-00607-8

Carlsson, J.G., Song, S., 2017, Coordinated logistics with a truck and a drone. Manage. Sci. 64 (9), 4052–4069.

Chang, Y. S., & Lee, H. J., (2018), Optimal delivery routing with wider drone-delivery areas along a shorter truck-route. Expert Systems with Applications, 104, 307-317. doi:10.1016/j.eswa.2018.03.032

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Chung, S. H., Sah, B., & Lee, J., (2020), Optimization for drone and drone-truck combined operations: A review of the state of the art and future directions. ComputersOperations Research, 123. doi:10.1016/j.cor.2020.10500

Chung, S.H., Sah, H., Lee, J., 2020, Pseudo node insertion method for synchronization in drone-truck combined operations. Transp. Res. C Emerg. Technol. Under review

Clarke, R., Moses, L.B., 2014, The regulation of civilian drones' impacts on public safety. Comput. Law Secur. Rev. 30 (3), 263–285.

Dalamagkidis, K., Valavanis, K.P., Piegl, L.A., 2008, On unmanned aircraft systems issues, challenges and operational restrictions preventing integration into the national airspace system. Prog. Aerosp. Sci. 44 (7–8), 503–519.

Dell'Amico, M., Montemanni, R., & Novellani, S., (2020), Matheuristic algorithms for the parallel drone scheduling traveling salesman problem. Annals of Operations Research, 289(2), 211-226. doi:10.1007/s10479-020-03562-3

Es Yurek, E., & Ozmutlu, H. C., (2018), A decomposition-based iterative optimization algorithm for traveling salesman problem with drone. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 91, 249-262. doi:10.1016/j.trc.2018.04.009

Freitas, J. C. d., & Penna, P. H. V., (2019), A variable neighborhood search for flying sidekick traveling salesman problem. International Transactions in Operational Research. doi:10.1111/itor.12671

Gomez-Lagos, J., Candia-Vejar, A., & Encina, F., (2021), A New Truck-Drone Routing Problem for Parcel Delivery Services Aided by Parking Lots. IEEE Access, 9, 11091-11108. doi:10.1109/access.2021.3050658

Gonzalez-R, P. L., Canca, D., Andrade-Pineda, J. L., Calle, M., & Leon-Blanco, J. M., (2020), Truck-drone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 114, 657-680. doi:10.1016/j.trc.2020.02.030

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Ha, Q. M., Deville, Y., Pham, Q. D., & Hà, M. H., (2018), On the min-cost Traveling Salesman Problem with Drone. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 86, 597-621. doi:10.1016/j.trc.2017.11.015

Ha, Q.M., Deville, Y., Pham, Q.D., Ha, M.H., 2018b, A hybrid genetic algorithm for the traveling salesman problem with drone, Technical report, arXiv preprint arXiv: 1812.0935lvl.

Ham, A. M., 2018, Integrated scheduling of m-truck, m-drone, and m-depot constrained by time-window, drop-pickup, and m-visit using constraint programming. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 91, 1-14. doi:10.1016/j.trc.2018.03.025

Hu W, Dong J, Hwang BG, Ren R, Chen Z., 2019, A scientometrics review on city logistics literature:research trends, advanced theory and practice. Sustainability 11:2724

Jeong, H. Y., Song, B. D., & Lee, S., 2019, Truck-drone hybrid delivery routing: Payload-energy dependency and No-Fly zones. International Journal of Production Economics, 214, 220-233. doi:10.1016/j.ijpe.2019.01.010

Kim, S., & Moon, I., 2019, Traveling Salesman Problem With a Drone Station. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 49(1), 42-52. doi:10.1109/tsmc.2018.2867496

Kitjacharoenchai, P., Ventresca, M., Moshref-Javadi, M., Lee, S., Tanchoco, J. M. A., & Brunese, P. A., 2019, Multiple traveling salesman problem with drones: Mathematical model and heuristic approach. Computers & Industrial Engineering, 129, 14-30. doi:10.1016/j.cie.2019.01.020

Kwon, H., Kim, J., Park, Y., 2017, Applying LSA text mining technique in envisioning social impacts of emerging technologies: the case of drone technology. Technovation 60, 15–28.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Krok, A., 2018, Hyundai's self-driving truck completes first highway jaunt in South Korea. https://www.cnet.com/roadshow/news/hyundai-self-driving-truckfirst- highway-trip/. [Online; accessed 25-August-2018].

Liang, Y., Luo, Z., 2022, A Survey of Truck–Drone Routing Problem: Literature review and research prospects, Journal of the Operations Research Society of China, 10:343–377.

Lidynia, C., Philipsen, R., Ziefle, M., 2017, Droning on about drones–acceptance of and perceived barriers to drones in civil usage contexts. In: Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems. Springer, pp. 317–329.

Li B, Riley MW, Lin B, Qi E., 2006, A comparison study of customer satisfaction between the UPS and FedEx: an empirical study among university customers. Ind Manag Data Syst 106:182–199

Li, Y., Zhang, G., Pang, Z., Li, L., 2018, Continuum approximation models for joint delivery systems using trucks and drones. In: Enterprise Information Systems, pp. 1–30.

Luo, Z., Liu, Z., & Shi, J., 2017, A Two-Echelon Cooperated Routing Problem for a Ground Vehicle and Its Carried Unmanned Aerial Vehicle. Sensors (Basel), 17(5). doi:10.3390/s1705114

Macrina, G., Di Puglia Pugliese, L., Guerriero, F., & Laporte, G., 2020, Drone-aided routing: A literature review. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 120. doi:10.1016/j.trc.2020.102762

Marinelli, M., Caggiani, L., Ottomanelli, M., Dell'Orco, M., 2017, En route truck–drone parcel delivery for optimal vehicle routing strategies. IET Intel. Transport Syst. 12 (4), 253–261.

Moshref-Javadi, M., Hemmati, A., & Winkenbach, M., 2020, A truck and drones model for last-mile delivery: A mathematical model and heuristic approach. Applied Mathematical Modelling, 80, 290-318. doi:10.1016/j.apm.2019.11.020

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Moshref-Javadi, M., Lee, S., & Winkenbach, M., 2020, Design and evaluation of a multi-trip delivery model with truck and drones. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 136. doi:10.1016/j.tre.2020.101887

Murray, C. C., & Chu, A. G., 2015, The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 54, 86-109. doi:10.1016/j.trc.2015.03.005

Murray, C. C., & Raj, R., 2020, The multiple flying sidekicks traveling salesman problem: Parcel delivery with multiple drones. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 110, 368-398. doi:10.1016/j.trc.2019.11.003

Othman M. S., Shurbevski A., Karuno Y., 2017, Routing of Carrier-vehicle Systems with Dedicated Last-stretch Delivery Vehicle and Fixed Carrier Route, Journal of Information Processing, 25, 655-666

Otto A, Boysen N, Scholl A, Walter R., 2017, Ergonomic workplace design in the fast pick area. OR

Özden, G., Sarıçiçek, İ., 2021, Akıllı Dönüşüme Yolculuk, Artikel Akademi, s.155-174. Spectr 39:945–975

Poikonen, S., & Golden, B., 2020, Multi-visit drone routing problem. Computers & Operations Research, 113. doi:10.1016/j.cor.2019.104802

Poikonen, S., Wang, X., & Golden, B., 2017, The vehicle routing problem with drones: Extended models and connections. Networks, 70(1), 34-43. doi:10.1002/net.21746

Poikonen, S., Golden, B.L., Wasil, E.A., 2019, A branch-and-bound approach to the traveling salesman problem with a drone. INFORMS J. Comput. 31 (2), 335–346.

Punakivi M, Yrjölä H, Holmström J., 2001, Solving the last mile issue: Reception box or delivery box, Int J Phys Distrib Logist Manag 31:427–439

Sandbrook, C., 2015, The social implications of using drones for biodiversity conservation. Ambio 44 (4), 636–647.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Salama, M., & Srinivas, S., 2020, Joint optimization of customer location clustering and drone-based routing for last-mile deliveries. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 114, 620-642. doi:10.1016/j.trc.2020.01.01

Solodov, A., Williams, A., Al Hanaei, S., Goddard, B., 2018, Analyzing the threat of unmanned aerial vehicles (UAV) to nuclear facilities. Secur. J. 31 (1), 305–324.

Song L, Cherrett TJ, McLeod FN, Guan W., 2009, Addressing the last mile problem: the transport impacts of collection/delivery points. Transp Res Rec 2097:9–18

Statista, 2019, Fast 12 Millionen Sendungen pro Zustelltag. Statista website, https ://de.stati sta.com/infog rafik /9992/in-deuts chlan d-von-den-paket -und-kurie rdien sten-befoe rdert en-sendu ngen/. Accessed July 2019

Thibbotuwawa, A., Bocewicz, G., Zbigniew, B., Nielsen, P., 2019, A solution approach for UAV fleet mission planning in changing weather conditions, Applied Science.

Wang, X., Poikonen, S., & Golden, B., 2016, The vehicle routing problem with drones: several worst-case results. Optimization Letters, 11(4), 679-697. doi:10.1007/s11590-016-1035-3

Wang, Z., & Sheu, J.-B., 2019, Vehicle routing problem with drones. Transportation Research Part B: Methodological, 122, 350-364. doi:10.1016/j.trb.2019.03.005

Yaman H, Karasan OE, Kara BY, 2012, Release time scheduling and hub location for next-day delivery. Oper Res 60:906–917