


<https://academicopinion.org/>

Research Article / Araştırma Makalesi

Tarımsal Gıda Sektöründe Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi: Taşköprü Sarımsağı Üzerine Matematiksel Modelleme Örneği¹

Vehicle Routing Problem with Time Windows in Agricultural Food Sector: Mathematical Modeling Example on Taşköprü Garlic

Fuat KARAHMUTOĞLU¹ Adem TÜZEMEN²

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat/Türkiye, f.karamahmutoglu6619@gop.edu.tr

² Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Tokat/Türkiye, adem.tuzemen@gop.edu.tr

ÖZET

Tarımsal gıda alanında sürdürülebilir bir tedarik zincirinin oluşturulması açısından lojistik oldukça kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışma, Kastamonu'nun Taşköprü ilçesinde sarımsak üreten bir firmanın, 18 farklı şehre aylık olarak gerçekleştirdiği 24 ton ürün dağıtımındaki lojistik optimizasyon sorununu incelemektedir. Araştırmada, zaman pencereci araç rotalama problemi (ZPARP) için detaylı bir matematiksel model oluşturulmuş ve bu model GAMS Studio (49.6.1) yazılımı ile çözüme ulaştırılmıştır. Geliştirilen model, her teslimat noktasında farklı kabul saatlerini, 4 tonluk araç kapasitesi kısıtını ve çoklu dağıtım gereksinimlerini aynı anda optimize etmektedir. Modelin çözümü, 14 saat 38 dakikalık bir hesaplama süresinin ardından en ideal sonuca ulaşmış ve toplamda 7 farklı rota belirlenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda toplam dağıtım gideri 161.612,88 TL olarak belirlenmiştir. Bu durum, kilogram başına ortalama dağıtım maliyetinin 6,73 TL olduğu anlamına gelmektedir. Araç kapasitesinin etkin kullanımı bakımından, rotaların %57'sinde tam doluluk (%100) sağlanırken, rotaların 3'ünde %87,5 kapasite kullanımı ve kalan 1 rotada ise %25'lik kapasite kullanımı sağlanmıştır. Toplamda 10.802 km'lik bir mesafe kat edilen bu rotalar, tüm zaman dilimi sınırlamalarını karşılamaktadır ve en uzun rota 2154 km uzunluğunda olması dolayısıyla, iki sürücü ile yasal çalışma süresi sınırları içinde kalmaktadır. Maliyet yapısı incelendiğinde, sürücü maliyetlerinin toplam maliyetin %40,1'ini (64.818 TL), yakıt giderlerinin %38,5'ini (62.225,28 TL) ve araç amortisman maliyetlerinin ise %21,4'ünü (34.569,60 TL) oluşturduğu belirlenmiştir. Önerilen modelin tarımsal gıda sektörü için zamanında teslimatların sistematik olarak planlanmasında uygulanabilir bir çözüm sağladığı ve benzer işletmelere ölçeklenebilir bir optimizasyon aracı sunduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi, Matematiksel Modelleme, GAMS, Tarımsal Lojistik, Maliyet Optimizasyonu

ABSTRACT

Logistics plays a critically important role in establishing a sustainable supply chain in the agricultural food sector. This study examines the logistical optimization problem faced by a garlic-producing company in Taşköprü district of Kastamonu for the monthly distribution of 24 tons of products to 18 different cities. In the research, a detailed mathematical model was developed for the time-windowed vehicle routing problem (TWVRP) and this model was solved using GAMS Studio (49.6.1) software. The developed model simultaneously optimizes different acceptance hours at each delivery point, 4-ton vehicle capacity constraints, and multi-point distribution requirements. The model solution reached the optimal result after a computation time of 14 hours and 38 minutes, determining a total of 7 different routes. According to the obtained findings, the total distribution cost was determined as 161.612,88 TL. This means that the average distribution cost per kilogram is 6,73 TL. In terms of effective vehicle capacity utilization, 100% capacity was achieved on 57% of the routes, while 87.5% capacity utilization was achieved on 3 routes, and 25% capacity utilization was achieved on the remaining 1 route. These routes, covering a total distance of 10.802 km, meet all time window constraints, and with the longest route being 2,154 km, they remain within legal working time limits with two drivers. When examining the cost structure, driver costs constitute 40.1% of the total cost (64.818 TL), fuel expenses account for 38.5% (62.225,28 TL), and vehicle depreciation costs represent 21.4% (34.569,60 TL). It has been determined that the proposed model provides an applicable solution for systematic planning of time-critical deliveries in the agricultural food sector and offers a scalable optimization tool for similar enterprises.

Keywords: Time-Windowed Vehicle Routing Problem, Mathematical Modeling, GAMS, Agricultural Logistics, Cost Optimization

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi

Başvuru Tarihi: 25 Haziran 2025

Kabul Tarihi: 14 Temmuz 2025

Makale Türü

Araştırma Makalesi

Sorumlu Yazar

Fuat Karamahmutoglu

ARTICLE INFOS

Article History

Received: June 25, 2025

Accepted: July 14, 2025

Article Type

Research Article

Responsible Author

Fuat Karamahmutoglu

*Bu çalışma ikinci yazarın danışmanlığında birinci yazar tarafından hazırlanan doktora tezinden türetilmiştir.

1. Giriş

Dünya genelindeki nüfusun hızla büyümesi ve tüketici tercihlerindeki değişiklikler, tarımsal gıda sektörünü sürdürülebilir ve etkili tedarik zinciri yönetimi açısından önemli bir noktaya getirmektedir. İşletmelerin uluslararası rekabet koşullarında ayakta kalabilmesi ve kâr marjını artırabilmesi için etkili ve verimli bir tedarik zinciri yönetimine sahip olmaları gerekmektedir (McCullough ve Matson, 2024). Tedarik zinciri yönetiminin temel unsurlarından biri olan lojistik, işletmeler açısından maliyet, süre ve mesafe bakımından önemli bir optimizasyon alanı sunmaktadır.

Tarımsal gıda sektörü ise lojistik açısından diğer sektörlerle nazaran daha karmaşık bir yapı göstermektedir. Chen vd. (2024), taze gıda taleplerinin yükselmesiyle birlikte soğutmalı taşımacılığın lojistik operasyonlarının vazgeçilmez bir parçası haline geldiğini ve mevcut sistemlerin genellikle yüksek enerji tüketimi ve maliyet sorunlarıyla mücadele ettiğini ifade etmişlerdir. Prajapati vd. (2022), dünya genelindeki nüfus artışının ve gıda güvenliğiyle ilgili endişelerin tarım sektörü için sürdürülebilir tedarik zinciri kavramını önemli bir hale getirdiğini belirtmişlerdir.

Tarım ürünlerinin tazeliği, kalitesi ve uygun fiyatı, müşteri memnuniyetini sağlamak açısından son derece önemlidir. Bu beklentilerin yerine getirilebilmesi için üreticiden tüketiciye zamanında ve güvenli bir teslimat sağlamak son derece önemlidir. Ürünlerin, üretim yerinden ara tedarikçilere veya son kullanıcılara en kısa mesafe, en hızlı şekilde ve en uygun maliyetle ulaştırılması gereklidir (Worasan vd., 2022).

Tarımsal gıda sektöründe ürünlerin dayanıklılığını etkileyen birçok etken bulunmaktadır. Bunlar arasında sıcaklık koşulları, son kullanma tarihinin yaklaşması ve zaman kısıtlamaları yer alır. Zhang vd. (2020), zaman değişkenli yol ağında taze gıda taşınmasıyla ilgili olarak hem gıda güvenliği güvencesi hem de sıcaklık kontrolünün önemini vurgulamışlardır. Wang vd. (2024), taze ürünlerin lojistik dağıtımında müşteri zaman dilimleri ile sıcaklık kontrolünün uygun kombinasyonundaki aksaklıklara dikkat çekmişlerdir.

Bu nedenlerden ötürü, tarımsal gıda alanında bir araç rotalama modeli geliştirilirken gereken kısıt sayısı diğer sektörler göre daha fazladır. En dikkat çekici farklılıklardan biri de zaman kısıtıdır. Her ürünün belirli bir teslimat süresi olabilir, bu da matematiksel modeli zorlaştırmaktadır. Ancak etkili bir zaman pencereli araç rotalama modeli kullanarak sektördeki olumsuzluklar büyük ölçüde hafifletilebilir.

Bu çalışmada, Kastamonu'nun Taşköprü ilçesinde sarımsak üreten bir işletmenin ürün dağıtımında karşılaştığı zaman, mesafe ve maliyetle ilgili zorluklar incelenmiştir. Bu çalışmanın hedefi, en kısa güzergâh ve en uygun maliyetle birlikte zaman kısıtlarını da göz önünde bulundurarak bir dağıtım ağı oluşturmak için Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi (ZPARP) üzerine bir matematiksel model geliştirmek ve bu modeli GAMS yazılımı ile optimize etmektir. Geliştirilen model, Türkiye'deki 18 ile yapılan dağıtımlar sırasında zaman pencereleri içinde mesafeyi ve maliyeti en iyi hale getirmeyi hedeflemektedir.

Çalışmanın organizasyonu şu şekildedir: İkinci bölümde, araç rotalama problemleri ile zaman pencereli araç rotalama problemlerinin teorik temelleri ve ilgili literatüre dair bir inceleme yer almaktadır. Üçüncü bölümde, Taşköprü sarımsağı örneği üzerinden problemin tanımlanması, matematiksel modelin oluşturulması, GAMS yazılımıyla çözüm süreci ve duyarlılık analizi üzerinde ayrıntılı bir şekilde durulmaktadır. Son kısımda, araştırma bulgularının analizi, elde edilen sonuçlar ve gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

2. Araç Rotalama Problemleri (ARP)

Araç rotalama problemleri, 1959 yılından bu yana sürekli olarak gelişen ve özellikle tarımsal gıda endüstrisinde büyük bir öneme sahip olan bir optimizasyon dalıdır. Bu bölümde öncelikle ARP literatürünün tarihsel süreci ele alınmaktadır. Ardından, problemin ana kavramları ve matematiksel yapısı detaylı bir şekilde incelenmektedir.

2.1. Araç Rotalama Problemlerinin Tarihsel Gelişimi ve Literatür Taraması

1959-1970 Dönemi (Temellerinin Atılması): Araç rotalama problemiyle ilgili ilk araştırma, Dantzig ve Ramser (1959) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, benzin teslimat kamyonlarının bir ana terminalden çok sayıda servis istasyonuna en uygun yollarla yönlendirilmesi problemine odaklanmıştır. Bu çalışma, Gezin Satıcı Probleminin bir genişlemesi olarak araç rotalama probleminin temelini atmıştır.

Clarke ve Wright (1964), Dantzig ve Ramser'in yöntemini geliştirerek tasarruf algoritması adı verilen etkili bir ağgözlü algoritma önermişlerdir. Bu algoritma, merkezi bir depodan birçok teslimat noktasına araçların zamanlamasını yapmayı amaçlayarak, uzun yıllardır araç rotalama problemlerinin çözümünde başvurulan temel sezgisel yöntemlerden biri haline gelmiştir.

1980-1990 Dönemi (Zaman Kısıtlamalarının Eklenmesi): Solomon (1987), zaman pencereli araç rotalama problemleri üzerine kapsamlı algoritmalar geliştirmiş ve bu konudaki test problemleri için bir dizi oluşturarak araştırmacıların kullanabileceği standart karşılaştırma kriterleri belirlemiştir. Bu araştırma, ekleme temelli sezgisel yöntemlerin sürekli olarak yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuş ve zaman pencereli araç rotalama problemlerinin teorik temelini desteklemiştir.

1990-2000 Dönemi (Stokastik ve Genel Modeller): Gendreau vd. (1996), stokastik araç rotalama problemlerinin temelini oluşturarak belirsizlik ortamlarında optimizasyon yöntemleri geliştirmişlerdir.

2000-2010 Dönemi (Kapsamlı Model Geliştirme): Toth ve Vigo (2002), VRP'nin kesin çözüm yöntemleriyle sezgisel yaklaşımını içeren kapsamlı bir monografi yayımlayarak temel araçlar, zaman pencereleri ile birlikte geri toplama ve alma-teslimat varyantlarını ayrıntılı olarak ele almışlardır. Goel ve Gruhn (2008), genel araç rotalama problemleri için esnek modelleme yöntemleri önererek çok kriterli optimizasyon açısından bir bakış açısı sağlamışlardır. Kara vd. (2008), kümülatif araç rotalama problemlerini ele alarak geleneksel mesafe ve zaman minimizasyonuna ek olarak toplam sistem yükünün minimize edilmesi yaklaşımını geliştirmişlerdir. Çetin ve Gencer (2010) ise kesin zaman pencereleriyle birlikte, eş zamanlı dağıtım toplamalı araç rotalama probleminin matematiksel bir modelini oluşturmuşlardır.

2010-2020 Dönemi (Gelişmiş Algoritmalar): Atmaca (2012), kargo sektöründeki araç rotalama problemlerinin pratik uygulamalarını araştırarak, gerçek hayattaki kısıtların modelleme sürecine etkilerini ele almıştır. Kesintürk vd. (2015), araç rotalama problemlerini ve bunların çözüm yollarını ayrıntılı bir şekilde inceleyerek, farklı problem türlerine uygun olan metodolojileri değerlendirmişlerdir. Han ve Cueto (2015), atık toplama araçlarının rotalama problemlerine dair yaptıkları sistematik literatür incelemesi ile çevresel sürdürülebilirlik konusunu vurgulamışlardır.

Reyes vd. (2017), hareketli teslimat noktaları ve araç rotalama problemlerine odaklanarak günümüz e-ticaret lojistiğinin getirdiği yeni zorlukları modellemeye dahil etmişlerdir. Sezen ve Çam (2018), müşteri memnuniyetini ön planda tutarak toplam bekleme süresini

azaltmayı hedefleyen bir araç rotalama problemi üzerinde çalışmışlardır.

Çiçekli ve Cihangir (2019), Dubai'nin çöp toplama sistemine yönelik genetik algoritma destekli bir araç rotalama çözümü geliştirmişlerdir. Bu çalışma, kentsel atık yönetiminde optimizasyon yöntemlerinin başarısını ortaya koymaktadır. Yıldız ve Tüzemen (2018), tarafından kapasite kısıtlı araç rotalama problemine (KKARP) dal-kesme algoritmasıyla bir çözüm önerisi sunulmuştur. Çetin ve Özçakar (2019), akaryakıt dağıtım alanında araç rotalama problemleri için başlangıç çözüm algoritmaları geliştirmişlerdir. Marinakis vd. (2019) ise zaman pencereli araç rotalama problemleri için çoklu uyarlamalı parçacık sürüsü optimizasyonu algoritması geliştirmişlerdir. Ayrıca Tüzemen ve Yıldız (2019), minimum toplam mesafe rotalarını oluşturmak için kapasite sınırlı araç rotalama problemlerini (KKARP) uyarlayarak literatüre katkı sağlamıştır.

2020-2024 Dönemi (Sürdürülebilirlik ve Tarımsal Uygulamalar): Chung vd. (2020), drone ile kamyon hibrit operasyonları için araç rotalama optimizasyonuna dair geniş kapsamlı bir literatür taraması yaparak, gelecek nesil lojistik sistemlerinin eğilimlerini ortaya koymuşlardır.

Zhang vd. (2020), zaman değişkenlik gösteren bir yol ağı üzerinde taze gıda taşımacılığı için güvenilirliği ve sıcaklık kontrolünü birleştiren rotalama problemini optimize etmişlerdir. Yurdakul vd. (2021), evde sağlık hizmetlerinin planlaması amacıyla araç rotalama ve zamanlama problemini geliştirerek sağlık sektöründe optimizasyon tekniklerinin etkinliğini ortaya koymuşlardır.

Jrapapati vd. (2022), elektronik ticaret sektöründe tarımsal gıda tahıllarının sürdürülebilir araç rotalamalarını incelemişlerdir. Worasan vd. (2022), Tayland'ın gıda endüstrisinde Endüstri 3.5 kapsamında hibrit yarasa algoritması ile çok ürünli çapraz yükleme araç rotalama problemini değerlendirmişlerdir. Şehitoğlu ve Ağayeva (2022), homojen ve heterojen filosu olan araçların kapasite kısıtlı rotalama problemleri üzerine bir karşılaştırmalı uygulama çalışması yaparak, filo yönetimi stratejilerinin sistem performansına etkilerini değerlendirmişlerdir.

Boz vd. (2023), yeşil zaman pencereli ve eş zamanlı topla dağıtım araç rotalama problemlerini üst düzey yöntemler kullanarak çözmüşlerdir. Dedetürk vd. (2023), zaman pencereli araç rotalama problemleri için kümeleme temelli bir klonal seçim algoritması geliştirerek biyolojik optimizasyon tekniklerinin etkinliğini ortaya koymuşlardır. Kalaycı ve Yılmaz (2023), elektrikli araç rotalama problemlerine ilişkin geniş bir literatür taraması yaparak, sürdürülebilir ulaşım sistemleri için gelişim eğilimlerini analiz etmişlerdir.

Chen vd. (2024), taze gıda lojistiğinde enerji kullanımını göz önünde bulunduran çok araçlı zaman değişkenli bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Bu model, yol tıkanıklığındaki zaman içindeki değişimleri ve taze ürünlerin kalite bozulma özelliklerini incelemektedir. Dağıstanlı (2024), askeri bir ilaç fabrikası üzerinden çok ürünli ve çok depolu araç rotalama problemini analiz ederek, savunma sanayisinde lojistik optimizasyonunun önemini vurgulamıştır. McCullough ve Matson (2024), tarımsal gıda tedarik zincirlerinde sürdürülebilirliğin geliştirilmesinde ara aktörlerin önemli bir rol oynadığını inceleyerek, çevre dostu lojistik yaklaşımlarının önemini vurgulamışlardır. Polimeni vd. (2024), elektrikli araçlar kullanarak kentsel kargo dağıtımı için çeşitli çözüm yöntemlerini değerlendirmiş ve gelecek nesil şehir lojistiği sistemleri hakkında öngörülerde bulunmuşlardır.

Bu kapsamlı literatür incelemesi, araç rotalama problemlerinin çok yönlü bir araştırma alanı olduğunu ve özellikle sürdürülebilirlik,

teknolojik entegrasyon ile sektörel çeşitlilik konularında sürekli bir gelişim içerisinde bulunduğunu göstermektedir.

2.2. Kapasite ve Mesafe Kısıtlı Araç Rotalama Problemleri

Araç rotalama problemlerinin en yaygın çeşitleri, araçların fiziksel sınırlamaları ve operasyonel kısıtlamaları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Bu problemler, esasen kapasite sınırlı araç rotalama problemleri (KKARP) ve mesafe kısıtlı araç rotalama problemleri (MKARP) olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Her iki problem türü de gerçek yaşamda önemli bir rol oynamaktadır ve özellikle lojistik işlemlerin verimliliğini doğrudan etkilemektedir.

2.2.1. Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi (KKARP)

Kapasite kısıtlı araç rotalama problemleri, araç rotalama alanındaki en temel ve sık incelenen varyantlardan biridir. Bu tür problemlerde, araçların kapasiteleri önceden belirlenmiştir ve genellikle her bir aracın kapasitesi eşit kabul edilir. Homojen filo yapıları kadar heterojen filo yapıları da literatürde önemli bir yer edinmiştir. Benzer şekilde, müşteri talepleri de deterministik bir şekilde önceden belirlenmektedir ve problem çözümü sürecinde sabit olarak ele alınır.

Kapasite sınırlı araç rotalama problemlerinde, araçlar merkez depodan yola çıkarak ürünlerini belirlenen müşteri noktalarına dağıtmakta ve görevlerini tamamladıktan sonra yeniden depoya dönmektedirler. KKARP'deki temel hedef, araç kapasitesinin sınırlarını aşmadan en fazla malın taşınması ve toplam rotalama maliyetlerinin azaltılmasıdır (Praveen vd., 2022). Bu optimizasyon süreci, operasyonel verimliliği artırırken aynı zamanda lojistik giderlerini de önemli ölçüde düşürmektedir.

KKARP'nin pratik hayattaki kullanımları oldukça çeşitlidir. Market zincirlerinin dağıtım noktalarından perakende mağazalarına ürün ulaştırılması, içecek şirketlerinin bayilerine mal sevkiyatı gerçekleştirilmesi, eczanelere ilaç dağıtımı için depolardan yapılan taşıma işlemleri, e-ticaret firmalarının kargo teslimatları ve tarımsal ürünlerin üreticilerden toptancılara transferi bu tür problemlere en iyi örnekleri oluşturmaktadır. Son yıllarda e-ticaretin yükselişiyle birlikte KKARP'nin önemi giderek artmıştır.

Problemin tanımlanmasında, kapasite kısıtları ağırlık ve hacim açısından değerlendirilebilir. Bazı uygulamalarda yalnızca ağırlık kısıtları yeterli olsada, mobilya taşımacılığı gibi sektörlerde hacim sınırlamaları daha ön planda yer almaktadır. Günümüzdeki modern KKARP çalışmalarında çok boyutlu kapasiteler de göz önünde bulundurulmaktadır.

KKARP, çözüm yöntemleri bakımından iki ana grupta incelenmektedir: kesin çözüm algoritmaları ve sezgisel/üstsezgisel yaklaşımlar. Küçük ölçekli problemler için dal-sınır, dal-kesit ve dal-fiyat gibi kesin çözümler tercih edilirken, daha büyük ölçekli gerçek hayattaki problemler için genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu, tabu arama ve benzetimli tavlama gibi sezgisel yöntemler kullanılmaktadır.

KKARP'nin amaç fonksiyonu ve kısıtlarıyla ilgili matematiksel modeli şu şekilde sunulmaktadır (Toth ve Vigo, 2002; Keskintürk vd., 2015):

Notasyonlar:

N: Müşteri sayısı

K: Araç sayısı

C: Araç kapasitesi

C_{ij}: Müşteri *i* den müşteri *j* ye gidene kadarki seyahat süresi

Karar Değişkenleri:

X_{ijk} : k aracı i den j ye gidiyorsa 1, aksi halde 0

Amaç Fonksiyonu:

$$\min Z = \sum_{k \in K} \sum_{ij \in A} C_{ij} X_{ijk} \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta^+(i)} X_{ijk} = 1, \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j \in (0)} X_{0jk} = 1, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ijk} - \sum_{i \in \Delta^+(j)} X_{ijk} = 0, \forall k \in K, \forall j \in N \quad (4)$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)}^{(f)} x_{i,n+1,k} = 1, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N}^{(n+1)} d_j \sum_{j \in \Delta^+(i)} X_{ijk} \leq C, \forall k \in K \quad (6)$$

$$X_{ijk} \geq 0, \forall k \in K, (i, j) \in N \quad (7)$$

$$X_{ijk} \in (0, 1), \forall k \in K, (i, j) \in N \quad (8)$$

Denklem (1), modelin amaç fonksiyonunu belirlemekte ve tüm araçların kat ettikleri toplam mesafeyi en aza indirmeyi hedeflemektedir. Bu amaç fonksiyonu, lojistik süreçlerdeki önemli maliyet kalemlerinden biri olan ulaştırma masrafını optimize etmektedir. Modelin kısıtları değerlendirildiğinde: Denklem (2), müşteri hizmeti kısıtını belirterek her bir müşterinin yalnızca bir araç tarafından ziyaret edilmesini güvence altına almaktadır. Denklem (3) ise araç çıkış kısıtını ifade ederek, merkezi depodan hareket eden her aracın rotaya dahil olmasını sağlamaktadır. Denklem (4) akış dengeleme kısıtı olarak tanımlanır ve bir aracın bir müşteri noktasına ulaştıktan sonra o noktadan ayrılmasını zorunlu hale getirir. Denklem (5) ise rota sonlandırma kısıtını belirtir; bu kısıt, tüm rotaların merkezi depoda sona ermesini garanti eder. Denklem (6), kapasite kısıtını belirtmekte ve her rotada toplam müşteri taleplerinin araç kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. Denklem (7) ise, değişkenlerin negatif olmaması gerektiğini ifade etmektedir. Son kısıt olan Denklem (8), karar değişkenlerinin yalnızca 0 veya 1 değerlerini almasını belirlemekte ve problemin kombinatoriyal yapısını göstermektedir.

2.3. Mesafe Kısıtlı Araç Rotalama Problemleri (MKARP)

Mesafe kısıtlı araç rotalama problemlerinde (MKARP), araçlar belirli bir mesafeyi aşamayacak şekilde hareket ederler (Li, 1992). Bu durum, araçların belirli bir süre boyunca çalışmaması veya herhangi bir aksaklık yaşanmaması halinde kullanılmaktadır (Kesintürk vd., 2015). Mesafe kısıtlı araç rotalama problemine dahil edilecek olan kısıtlama:

Notasyon:

T : Araçların kat edeceği maksimum sınır

$$\sum_{i=0} \sum_{j=0} C_{ijk} X_{ijk} \leq T \quad (9)$$

Burada eklenen kısıt denklem (9), araçların gidebileceği maksimum mesafeyi belirtmektedir.

2.4. Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemleri (ZPARP)

Zaman pencereli araç rotalama problemleri (ZPARP), kapasite sınırlı araç rotalama problemlerinin her bir düğüme zaman aralığı kısıtlamaları eklenerek oluşturulmuş bir modeldir. Bu modelde, müşteriler için erken ve geç kabul zaman dilimleri eklenmiştir (Boz vd., 2023). Eklenen (a, b) aralığı, a(i) dağıtımının erken başlanması ve b(i) dağıtımının geç başlanması anlamına gelir (Çetin ve Gencer, 2010). Zaman kısıtlı araç rotalama problemlerinde ek sınırlamalar

devreye girdiği için oldukça tatmin edici olmayan sonuçlar ortaya çıkabilir. Bu durumun önüne geçmek amacıyla daha sistematik bir yaklaşım benimsemek önem arz etmektedir (Marinakos vd., 2019). Ayrıca, zaman pencereli araç rotalama problemlerine ihtiyaç doğrultusunda yasal çalışma süreleri, aracın hızı ve zorunlu molalar gibi ek kısıtlamalar eklenebilir.

Zaman pencereli araç rotalama problemleri, esnek zaman pencereli araç rotalama problemi ve sert zaman pencereli araç rotalama problemi olarak ikiye ayrılmaktadır (Li vd., 2025):

Esnek zaman pencereli araç rotalama problemi; müşterilerin belirlediği zaman aralıklarında mümkün olduğu kadar erken teslimatı zorunlu kılmaktadır. Aksi durumda ise ek ceza maliyeti gerektirmektedir.

Sert zaman pencereli araç rotalama problemi; müşterilerin belirlediği zaman aralıklarında teslimatın yapılması gerektiğini aksi takdirde müşterilerin ürün teslimi almayacağı durumu ifade etmektedir.

ZPARP algoritması geliştirilirken bazı varsayımlar kabul edilmesi gerekmektedir. Bu varsayımlar (Liu, vd., 2023):

- Dağıtım merkezi ve müşteri konumları önceden belirlenmiştir.
- Tüm araçların kapasiteleri ve türleri aynıdır.
- Dağıtım merkezin müşteri düğümlerine ve yine müşteri düğümlerinden müşteri düğümlerine olan mesafeler önceden bilinmektedir.
- Dağıtım araçları merkezden çıkış saatleri '0' olarak kabul edilir.
- Her dağıtım aracı birden fazla müşteri düğüme hizmet verebilirken, her müşteri düğüme yalnızca bir araç hizmet verebilmektedir.
- Müşteri düğümlerinin talepleri önceden belirlenmiştir.
- Her müşteri düğümünün talebi araç kapasitesinden küçüktür ve birden fazla araç veya aynı araç ile birden fazla hizmet verilemez.
- Araçlar sadece tek bir rotada görev yapabilirler.

ZPARP'de amaç fonksiyonunu belirlerken üç maliyet dikkate alınmaktadır. Birinci maliyet algoritmanın taşıma maliyetini optimize eder. İkinci maliyet kapasite ceza maliyetini optimize ederken üçüncü maliyet ise zaman cezasını optimize etmeyi amaçlamaktadır.

$$\text{Min Maliyet} = \text{Maliyet}_{\text{Taşıma}} + \text{Maliyet}_{\text{KapasiteCeza}} + \text{Maliyet}_{\text{ZamanCeza}} \quad (10)$$

Burada (10) maliyet optimizasyonu yapılırken hem taşıma maliyetini hem kapasite ceza maliyetini hem de zaman ceza maliyetini aynı anda optimize etmeye odaklanmaktadır. Taşıma maliyeti aracın gittiği mesafe ile yakından ilgilidir. Yakıt maliyeti, amortisman maliyeti, şoför ve işçilik maliyeti gibi maliyet kalemleri etkili olmaktadır. Kapasite ceza maliyeti, aracın dağıtım noktalarına yük taşıırken maksimum araç kapasitesinden fazla yük alırsa oluşturduğu ceza maliyetidir. Zaman ceza maliyeti ise esnek zaman pencereli araç rotalama problemlerinde müşterilerin ürün teslim kabul alma zaman aralığında müşterilere ürün teslim edilmemesi durumunda oluşan ceza maliyetidir. Burada zamanında teslimatını gerçekleştiren araçlara ceza uygulanmazken sadece geç teslimat

yapan araçlara ceza uygulanmaktadır. Chen, vd., (2025) ise matematiksel formülasyonları şu şekilde göstermiştir:

$$\min F = F_1 + F_2 \quad (11)$$

$$F_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M X_{i,j,k} \cdot d_{i,j}, \quad \forall i \neq j \quad (12)$$

$$F_2 = \sum_{j=1}^M P_j \quad (13)$$

Burada denklem (11)'de amaç fonksiyonunda maliyet minimizasyonunu göstermektedir. Denklem (12)'de taşıma işlemi ile gerçekleşen maliyetleri kapsamaktadır. Denklem (13) ise zamanında teslimat gerçekleşmediği durumunda karşılaşılabilecek ceza maliyetini temsil etmektedir.

Ayrıca zaman kısıtı olarak aşağıdaki denklemler eklenmektedir.

$$a_i \leq \text{start}_i \leq b_i, \quad \forall i \in (1, 2, 3, 4, \dots, N) \quad (14)$$

$$\text{start}_i = \max \left(a_i, \sum_{j=1}^N X_{j,i,k} \cdot (\text{start}_j + S_j + d_{i,j}) \right), \quad \forall i \neq j, \forall k \in (1, 2, 3, \dots, M) \quad (15)$$

Burada denklem (14) ve denklem (15)' hizmet sürelerinin zaman kısıtları içerisinde olması gerektiğini ifade etmektedir.

Zaman pencereli araç rotalama problemi ile alakalı çok sayıda araştırma olmasına rağmen son zamanlarda yapılan araştırmaların bazıları incelenmiştir. Topaloğlu vd., (2023), farklı ürünlerin aynı araçta taşınabilmesini sağlayan heterojen filo, çok kompartımanlı ZPARP için bir çalışma yapmıştır. Bakım ve onarım çalışması yapan bir firma için zaman pencereli çok depolu araç rotalama problemi için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir (Toru ve Yılmaz, 2023). Faramarzadeh ve Akpınar (2023), tarafından zaman pencereli ve toplamalı-dağıtımli araç rotalama problemini etkin bir şekilde çözmek için yaklaşım algoritması olan gri kurt optimizasyon algoritması modeli tasarlanmıştır. Ayrıca seyahat sürelerinde yaşanan belirsizlikleri dikkate alarak hem rotaları hem de zaman kısıtlarını eş zamanlı optimize eden ve zaman penceresi ihlal riskini minimize etmeyi hedefleyen bir model tasarlanmıştır (Hoogeboom vd., 2021).

2.5. Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemleri (TDARP)

Dağıtım toplamalı araç rotalama problemlerinde, müşteriler çeşitli nedenlerle ürünlerini iade edebilir. Bu nedenler arasında memnuniyetsizlik ya da son kullanım tarihlerinin geçmesi gibi durumlar yer almaktadır (Cömert vd., 2019). Geri toplama araç rotalama problemleri, müşterilerin depozito, ambalaj ve palet gibi ürünleri iade etmesi durumunda ortaya çıkmaktadır (Düzakın ve Demircioğlu, 2009).

Araç kapasiteleri belirlenirken dağıtım ve toplama süreçleri göz önünde bulundurulmalıdır. Topla-dağıt modellerinde, müşteri taleplerinin araç kapasitesini aşmaması gerekir. Dağıtım toplamalı araç rotalama problemlerine dahil edilebilecek bir diğer kısıtlama ise şudur:

$$\sum_{j \in A} k_{ij} + \sum_{j \in A} k_{ji} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (16)$$

Denklem (10) uyarınca, her aracın başlangıç deposuna geri döneceği belirtilmektedir.

Topla-dağıt araç rotalama problemleri, dağıtım ve toplama senaryolarına bağlı olarak üçe ayrılmaktadır: eş zamanlı topla-dağıt, önce dağıt sonra topla ve karışık topla-dağıt araç rotalama problemleri.

2.5.1. Eş Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemleri (EZTDARP)

Eş Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemleri (EZTDARP), toplama ve dağıtım işlemlerinin aynı anda, tek bir rota üzerinde yapıldığı durumları incelemektedir. Bu yöntemde araçlar, her müşteri noktasına yalnızca bir kez giderek teslimat ve geri alma işlemlerini aynı anda gerçekleştirmektedir. EZTDARP'nin literatürdeki ilk uygulaması ise Min (1989) tarafından kütüphaneler arası kitap dağıtım problemi için tasarlanmıştır.

Bu modelde, bir araç müşteri konumuna ulaştığında önce o yere ait teslimat ürünlerini indirmektedir. Daha sonra, aynı noktadan alınacak ürünleri yüklemektedir. Bu süreç içinde, tüm müşteriler aynı statüde ele alınmakta ve aralarında hiçbir öncelik ayrımı söz konusu olmamaktadır (Çetin ve Gencer, 2010; Yazgan ve Büyükyılmaz, 2017). EZTDARP'nin en önemli faydası, toplam mesafeyi azaltarak araç filosunun daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamasıdır.

Ancak bu yöntemi uygulamak için, araç içindeki yük düzenlemelerinin özenle planlanması gerekmektedir. Toplanan ürünler, teslimat sırasını etkilememelidir ve araç kapasitesinin hem giden hem de alınan ürünlerin toplam hacmini karşılayabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle EZTDARP, benzer özelliklere sahip ürünlerin taşındığı ve araç içi organizasyonun daha basit olduğu durumlarda sıklıkla tercih edilmektedir.

2.5.2. Önce Dağıt Sonra Topla Araç Rotalama Problemleri (ÖDSTARP)

Bu tür araç rotalama problemlerinde operasyon süreci iki aşamada yürütülmektedir. Öncelikle, araçlar müşterilere sırasıyla teslimat yaparak görevlerini tamamlamaktadır. Ardından, ikinci aşamada geri alma işlemlerine geçilmektedir. Bu yöntemin temel sebebi, araçlar dolu olduğunda toplama noktalarından alınan ürünlerin aracın içinde dağınıklığa neden olmasıdır. Bu durum, sonraki teslimat noktalarında doğru ürünü bulmayı zorlaştırmaktadır. Ayrıca, toplanan ürünlerin araç içindeki yerleşiminden dolayı teslimat ürünlerine ulaşmak zorlaşmakta ve boşaltma süreçleri verimsiz hale gelmektedir (Kantasa-ard vd., 2023).

Bu nedenle, ÖDSTARP'de araçlar ilk turda yalnızca teslimat yaparak kapasitelerini kullanmakta, ardından ikinci turda aynı müşteri ağı içinde rota oluşturarak sadece toplama işlemleri gerçekleştirmektedirler. Bu yöntem, operasyonel karmaşıklığı azaltırken toplam mesafenin artmasına ve araç kullanım verimliliğinin düşmesine neden olabilmektedir. Yine de bu senaryo, özellikle hassas ürünlerin taşındığı ve doğru teslimatın büyük önem taşıdığı sektörlerde daha sık tercih edilmektedir (Subramanian vd., 2010).

2.5.3. Karışık Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemleri

Karışık topla-dağıt araç rotalama problemleri (KTDARP), klasik eş zamanlı ve sıralı yöntemlerin sınırlarını aşmak için tasarlanmış esneklik sunan bir modeldir. Bu yöntemde, müşteri noktalarına birden fazla kez ziyaret gerçekleştirilmesi mümkün olup, operasyonel gereksinimlere göre çeşitli stratejiler hayata geçirilebilmektedir. Bir müşteri noktasında hem dağıtım hem de toplama işlemleri aynı anda yapılabilir. Alternatif olarak, önce dağıtım gerçekleştirip ardından aynı yere toplama işlemi için ayrı bir ziyaret düzenlemek de mümkündür. Kantasa-ard vd. (2023), dinamik sürdürülebilir çok depolu araç rotalama probleminde eş zamanlı toplama ve teslimat süreçlerinin fiziksel internet çerçevesinde nasıl optimize edileceğini incelemişlerdir.

KTDARP'nin en önemli avantajı, işletmelere operasyonel esneklik sağlayarak her müşteriye en uygun stratejiyi belirleyebilme olanağı

sunmasıdır. Bu özellik, özellikle ürünlerin farklılık gösterdiği, müşteri taleplerinin sürekli değiştiği ya da araç içi düzenlemenin hayati bir öneme sahip olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Cömert vd. (2019), eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi için iki aşamalı bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem, karışık operasyonların etkinliğini ortaya koymaktadır. Ancak, matematiksel modelleme açısından diğer yaklaşımlara nazaran daha karmaşık bir yapı gerektirdiği için, Subramanian vd. (2010) tarafından belirtildiği üzere, genellikle sezgisel ve üst-sezgisel algoritmalar tercih edilmekte ve büyük ölçekli problemler için yaklaşık çözüm yöntemleri kullanılmaktadır.

3. Uygulama

3.1. Araştırma Problemi ve Kapsamı

Türkiye'nin önde gelen tarımsal bölgelerinden biri olan Kastamonu ili, özellikle Taşköprü ilçesinde yoğunlaşan sarımsak üretimi sayesinde ülke ekonomisine önemli katkılarda bulunmaktadır. Taşköprü sarımsağı, coğrafi işaret ile korunan ve uluslararası kalite standartlarını karşılayan bir ürün olarak hem yerel piyasada hem de ihracatta büyük bir stratejik öneme sahiptir. Ancak, tarımsal ürünlerin üreticiden tüketiciye ulaşması sırasında yaşanan lojistik problemler, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler için büyük bir maliyet faktörü teşkil etmektedir.

Tarımsal gıda sektöründe lojistik giderleri, ürünlerin nihai satış fiyatının büyük bir kısmını etkilemekte ve bu durum işletmelerin rekabet gücünü doğrudan etkilemektedir. Özellikle taze ürünler arasında yer alan sarımsak gibi ürünlerin dağıtım söz konusu olduğunda, zaman önemli bir rol oynamaktadır. Geleneksel dağıtım yöntemleriyle gerçekleştirilen plansız rotalar, yakıt giderlerini yükseltmekte ve araçların kullanım verimliliğini düşürmektedir. Bu

durum, artan yakıt fiyatları ve operasyonel maliyetler dikkate alındığında, işletmelerin karlılığını olumsuz etkilemektedir.

Bu çalışmanın ana hedefi, gerçek bir tarımsal işletmenin karşılaştığı lojistik problemlere bilimsel temellere dayalı çözümlerle yaklaşarak, sektördeki diğer benzer şirketler için de uygulanabilir bir model geliştirmektir. Araştırmanın önemi, teorik araç rotalama yöntemlerinin tarımsal gıda alanındaki pratik uygulanabilirliğini ortaya koyması ve küçük ölçekli işletmelerin de modern optimizasyon tekniklerinden yararlanabileceğini ispatlamasıdır.

Kastamonu ilinin Taşköprü ilçesinde sarımsak yetiştiriciliği yapan XYZ İşletmesi, yıllardır bu alanda faaliyet göstermektedir. İşletme, bölgenin iklim ve toprak yapısından yararlanarak yüksek kalitede sarımsak üretmektedir. Ürettiği ürünleri ise Türkiye'nin farklı yerlerindeki hal merkezlerine toptan satış olarak sunmaktadır.

Satışları kendi araç filosu ile gerçekleştiren işletme sahibi, Kastamonu'daki ana deposundan hareketle talep noktalarına ürün teslim etmektedir. Mevcut durumda işletme, rotalarını deneyim ve sezgisel yöntemlerle belirlemekte; bu da hem operasyonel verimliliği azaltmakta hem de gereksiz maliyet artışlarını beraberinde getirmektedir. İşletmenin ürün teslimatında karşılaştığı zaman, maliyet ve mesafe problemleri nedeniyle, bilimsel bir yaklaşımla en uygun rotaların belirlenmesi ve zaman çerçevesi içinde maliyetin ve mesafenin en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

XYZ İşletmesinin şehirlerarası taşımacılıkta kullandığı aracın maksimum yük taşıma kapasitesi 4 tondur. İşletme, aylık düzenli talep oluşturduğu şehirler olan Adana, Afyonkarahisar, Ankara, Antalya, Aydın, Elâzığ, Giresun, Hatay, İstanbul, İzmir, Mersin, Ordu, Osmaniye, Rize, Samsun, Şanlıurfa, Tekirdağ ve Trabzon olmak üzere 18 farklı şehirdeki hal merkezlerine düzenli sevkiyat yapmaktadır. Talep oluşturan hal merkezlerinin aylık talep listesi Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1

Şehirlere göre hal merkezlerinin talep miktarları (kg)

İller	Talep Miktarı (kg)	İller	Talep Miktarı (kg)
Adana	2500	İzmir	1000
Afyonkarahisar	2500	Mersin	1000
Ankara	2500	Ordu	1000
Antalya	2500	Osmaniye	1000
Aydın	1000	Rize	1000
Elâzığ	1000	Samsun	1000
Giresun	1000	Şanlıurfa	1000
Hatay	1000	Tekirdağ	1000
İstanbul	1000	Trabzon	1000

Tablo 1'de görüldüğü üzere Adana, Afyonkarahisar, Ankara ve Antalya illerinin talepleri 2.500 kg iken diğer illerin talepleri ise her bir il için 1.000 kg'dır. Toplam aylık talep miktarı 24.000 kg olarak gerçekleşmektedir. Bu talep dağılımı, işletmenin farklı büyüklükteki pazarlara hizmet verdiğini ve rota planlamasında hem büyük hem de küçük hacimli teslimatları dikkate alması gerektiğini göstermektedir.

İller arasındaki mesafe bilgileri, maliyet optimizasyonunun hesaplanması için gerekli olan en önemli parametrelerden biridir. Mesafe verileri doğrudan yakıt tüketimi, araç aşınması ve sürücü maliyetlerini etkilemektedir. XYZ İşletmesinin sevkiyat gerçekleştirdiği şehirler arasındaki kilometre cinsinden mesafe değerleri Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2

Mesafeler matrisi (Km)

	Kast	Ada.	Afy.	Ank.	Ant.	Ayd.	Ela.	Gir.	Hat.	İst.	İzm.	Mer.	Ord.	Osm.	Riz.	Sam.	Ş.Ur	Tek.	Trab.
Kast.	0	687	499	243	780	841	799	485	878	510	822	680	441	774	696	290	946	642	621
Ada.	687	0	573	490	552	883	490	721	191	939	900	69	710	87	920	722	349	1071	845
Afy.	499	573	0	256	292	346	958	864	764	454	327	565	820	660	1075	669	922	586	1000
Ank.	243	490	256	0	544	598	755	608	681	453	579	483	564	577	819	413	804	585	744
Ant.	780	552	292	544	0	342	1042	1100	743	718	444	483	1056	639	1307	905	901	850	1232
Ayd.	841	883	346	598	342	0	1268	1206	1074	684	126	825	1162	970	1417	1011	1232	630	1342
Ela.	799	490	958	755	1042	1268	0	563	472	1208	1285	559	592	403	576	664	319	1340	501
Gir.	485	721	864	608	1100	1206	563	0	811	929	1187	790	44	742	211	195	792	1061	136
Hat.	878	191	764	681	743	1074	472	811	0	1130	1091	260	800	129	1010	812	331	1262	935
İst.	510	939	454	453	718	684	1208	929	1130	0	564	932	885	1026	1140	734	1257	132	1065
İzm.	822	900	327	579	444	126	1285	1187	1091	564	0	892	1143	987	1398	992	1249	506	1323
Mer.	680	69	565	483	483	825	559	790	260	932	892	0	779	156	989	744	418	1064	914
Ord.	441	710	820	564	1056	1162	592	44	800	885	1143	779	0	731	255	151	808	1017	180
Osm.	774	87	660	577	639	970	403	742	129	1026	987	156	731	0	941	743	262	1158	866
Riz.	696	920	1075	819	1307	1417	576	211	1010	1140	1398	989	255	941	0	406	879	1272	75
Sam.	290	722	669	413	905	1011	664	195	812	734	992	744	151	743	406	0	832	866	331
Ş.Ur	946	349	922	804	901	1232	319	792	331	1257	1249	418	808	262	879	832	0	1389	804
Tek.	642	1071	586	585	850	630	1340	1061	1262	132	506	1064	1017	1158	1272	866	1389	0	1197
Trab.	621	845	1000	744	1232	1342	501	136	935	1065	1323	914	180	866	75	331	804	1197	0

Tablo 2'deki mesafe matrisi, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün resmi istatistiklerine dayanmaktadır ve şehirlerarası en kısa yol mesafelerini göstermektedir. Bu bilgiler, araç rotalama modelinin ana girdilerini sağlamak ve optimizasyon sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Tarım gıda sektöründe zaman, ürün kalitesinin sürdürülebilirliği açısından oldukça kritik bir unsurdur. Farklı hal merkezlerinin çalışma saatleri ve ürün kabul süreleri, rota

planlamasında göz önünde bulundurulması gereken önemli sınırlamalar arasındadır. Her hal merkezinin kendine has operasyonel zaman aralıkları bulunmaktadır ve bu zaman dilimlerinin dışında gerçekleştirilen teslimatlar kabul edilmemektedir. Ürünlerin teslim edileceği yerlerdeki kabul saatleri Tablo 3'te belirtilmiştir.

Tablo 3

Hal merkezlerinin ürün kabul saat aralıkları

İller	En Erken Kabul	En Geç Kabul	İller	En Erken Kabul	En Geç Kabul
Adana	04:00	22:00	İzmir	06:00	20:00
Afyonkarahisar	09:00	18:30	Mersin	03:00	20:00
Ankara	07:30	19:30	Ordu	04:00	23:00
Antalya	04:00	18:00	Osmaniye	09:00	20:00
Aydın	06:30	18:00	Rize	09:00	18:00
Elâzığ	04:00	18:00	Samsun	01:00	19:00
Giresun	09:00	20:00	Şanlıurfa	09:00	20:00
Hatay	04:00	18:00	Tekirdağ	09:00	23:00
İstanbul	09:00	17:00	Trabzon	06:00	16:00

Tablo 3'te yer alan verilere göre, her hal merkezinin ürün teslim alma saatlerinin farklılık gösterdiği görülmektedir. Bu zaman aralıklarının çeşitliliği, rota planlamasında ilave bir karmaşıklık yaratırken, aynı zamanda daha etkili bir zaman yönetimi imkânı da sağlamaktadır. Ayrıca, her teslim noktasında boşaltma ve belgelerin işlenmesi için bir saatlik servis süresi gereklidir. İşletmenin maliyet yapısını oluşturan temel bileşenler arasında yakıt, araç amortismanı ve personel giderleri bulunmaktadır. XYZ İşletmesi, sevkiyat

sırasında araçlarının ortalama hızını saatte 75 kilometre olarak belirlemiştir. Bu araçlar, her 100 kilometrede ortalama 12 litre yakıt harcamaktadır. Araştırmanın gerçekleştirildiği dönemde, güncel yakıt fiyatı ise litre başına 48 TL olmuştur. Araç başına düşen amortisman gideri, kilometre üzerinden hesaplanmış ve 3,20 TL olarak tespit edilmiştir. Personel maliyetleri incelendiğinde ise, her araç için iki şoför atanmıştır. Bu uygulama, yasal düzenlemeler gereği günlük en fazla 9 saatlik sürüş süresini aşmadan uzun

mesafeli seferlerin yapılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, kilometre başına şoför maliyeti 6 TL olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, talep noktalarına gerçekleştirilen dağıtımın kısmen yapılmasına onay verilmiştir. Bu durum, araç kapasitelerinin daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Bu veriler doğrultusunda oluşturulan zaman pencereli araç rotalama problemi matematiksel modeli sayesinde toplamda 7 farklı rota belirlenmiş ve işletmenin mevcut dağıtım sisteminde önemli iyileştirmeler sağlanmıştır.

3.2. Matematiksel Modelin Tanımlanması

Bu bölümde, XYZ İşletmesinin sarımsak dağıtım problemini çözmek için tasarlanan zaman pencereli araç rotalama problemi matematiksel modelinin detayları sunulmaktadır. Model, zaman kısıtları, araç kapasiteleri ve maliyet optimizasyonunu aynı anda dikkate alacak şekilde tasarlanmıştır.

İndisler ve Kümeler

$i, j \in N$: Dağıtım noktalarını ifade eden indisler ($i, j = 1, 1, 2, \dots, 19$). Burada 1 indisi merkezi depo olan Kastamonu'yu, diğer indisler talep noktalarını temsil etmektedir.

$k \in K$: Araç filosundaki kullanılabilir araçları ifade eden indis ($k = 1, 2, \dots, 7$). Toplam 7 araçlık filo kapasitesi mevcuttur.

Parametreler

CC: Her aracın maksimum yük taşıma kapasitesi (4.000 kg). Tüm araçlar homojen kapasiteye sahiptir.

Depolar(i): Merkezi depo konumunu tanımlayan küme. Kastamonu ili merkez ilçesi ana depo konumunu ifade eder.

Musteri(i): Müşteri lokasyonlarını tanımlayan küme. 18 farklı şehirdeki hal merkezlerini kapsamaktadır.

BS: Büyük sayı parametresi (10.000). Modelin kısıt yapısında kullanılan yardımcı parametredir.

SM: Kilometre başına şoför maliyeti (6,00 TL/km). İki şoför sistemi ile çalışma maliyetini yansıtmaktadır.

AM: Kilometre başına araç amortisman maliyeti (3,20 TL/km). Araç değer kaybı ve bakım giderlerini içermektedir.

AH: Araçların ortalama seyahat hızı (75 km/saat). Şehirlerarası karayolu ortalama hızını temsil etmektedir.

Servis: Her dağıtım noktasında ürün boşaltma ve evrak işlemleri için gerekli süre (1 saat).

LF: Yakıt birim fiyatı (48,00 TL/litre). Güncel piyasa fiyatını yansıtmaktadır.

KY: 100 kilometre mesafede tüketilen yakıt miktarı (12 litre). Araç yakıt tüketim katsayısıdır.

M_i: i dağıtım noktasının aylık talep miktarı (kg cinsinden). Değişken talep yapısını göstermektedir.

C_{ij}: i noktasından j noktasına karayolu mesafesi (km). Karayolları Genel Müdürlüğü verilerine dayanmaktadır.

a_i: i dağıtım noktasının teslimat kabul başlangıç saati. Zaman penceresi alt sınırını belirler.

b_i: i dağıtım noktasının teslimat kabul bitiş saati. Zaman penceresi üst sınırını belirler.

zaman_{ij}: i noktasından j noktasına seyahat süresi. C_{ij} / AH formülü ile hesaplanır.

Karar Değişkenleri

z: Amaç fonksiyonunun değerini ifade eden ana karar değişkeni. Toplam sistem maliyetini minimize etmeyi hedefler.

x_{ijk}: İkili karar değişkeni. k aracının i noktasından j noktasına seyahat edip etmediğini gösterir (1: evet, aksi halde 0).

nt_{ki}: Sürekli karar değişkeni. k aracının i dağıtım noktasına teslim ettiği ürün miktarını (kg) ifade eder.

t_{ki}: Sürekli karar değişkeni. k aracının i noktasına varış zamanını (saat) gösterir.

cikis_{ki}: Sürekli karar değişkeni. k aracının i noktasından ayrılış zamanını (saat) belirtir.

ak_k: İkili karar değişkeni. k aracının kullanılıp kullanılmadığını gösterir (1: kullanıldı, aksi halde 0).

Maliyet Bileşeni Değişkenleri

Maliyet_k: k aracının toplam operasyonel maliyetini gösteren sürekli değişken.

Maliyet_yakit_k: k aracının toplam yakıt giderini hesaplayan sürekli değişken.

Maliyet_amortisman_k: k aracının toplam amortisman maliyetini hesaplayan sürekli değişken.

Maliyet_sofor_k: aracının toplam şoför giderini hesaplayan sürekli değişken.

Bu matematiksel formülasyon, tarımsal gıda sektörünün karmaşık lojistik gereksinimlerini karşılayacak şekilde tasarlanmış olup, zaman kritik teslimatların optimizasyonunu sağlamaktadır.

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Min } Z = \sum_{i,j,k} C_{ij} \left(\frac{KY}{100} \right) \cdot LF \cdot X_{ijk} + \sum_k a_k \cdot BS + \sum_{ijk} C_{ij} \cdot X_{ijk} \cdot SM + \sum_{ijk} C_{ij} \cdot x_{ijk} \cdot AM \quad (17)$$

Kısıtlar

$$\sum_i nt_{ki} \leq CC, \forall k \quad (18)$$

$$\sum_k nt_{ki} = M_i, \forall i \quad (19)$$

$$\sum_{j \in Musteri} X_{1,j,k} = 1, \forall k \quad (20)$$

$$\sum_{i \in Musteri} X_{i,1,k} = 1, \forall k \quad (21)$$

$$\sum_{j \neq i} X_{jik} = \sum_{i \neq j} X_{ijk}, \forall i \in Musteri, \forall k \quad (22)$$

$$\sum_j X_{jik} \cdot BS \geq nt_{ki}, \forall k, i \quad (23)$$

$$\text{Maliyet}_k = \sum_{i,j,k} C_{ij} \left(\frac{KY}{100} \right) \cdot LF \cdot X_{ijk} + \sum_{ijk} C_{ij} \cdot X_{ijk} \cdot SM + \sum_{ijk} C_{ij} \cdot x_{ijk} \cdot AM, \forall k \quad (24)$$

$$\text{Maliyet_yakit}_k = \sum_{i,j,k} C_{ij} \left(\frac{KY}{100} \right) \cdot LF \cdot X_{ijk}, \forall k \quad (25)$$

$$\text{Maliyet_amortisman}_k = \sum_{ijk} C_{ij} \cdot x_{ijk} \cdot AM, \forall k \quad (26)$$

$$\text{Maliyet_sofor}_k = \sum_{ijk} C_{ij} \cdot X_{ijk} \cdot SM, \forall k \quad (27)$$

$$\sum_{ij} X_{ijk} \geq a_k, \forall k \quad (28)$$

$$a_i \leq t_{ki}, \forall k, \forall i \in Musteri \quad (29)$$

$$t_{ki} \leq b_i, \forall k, \forall i \in Musteri \quad (30)$$

$$t_{ki} \geq cikis_{ki} + zaman_{ij} - (1 - X_{ijk}) \cdot BS, \forall k, \forall i \neq j \quad (31)$$

$$cikis_{ki} = t_{ki} + servis, \forall k, \forall i \in Musteri \quad (32)$$

Geliştirilen zaman pencereli araç rotalama problemi için matematiksel modelin kısıtları ve amaç fonksiyonu şu şekilde tanımlanmaktadır: Denklem (17), modelin amaç fonksiyonunu temsil eder ve sistemdeki tüm araçların toplam lojistik maliyetini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu hedef fonksiyonu, yakıt, amortisman ve sürücü giderlerini aynı anda optimize etmektedir. Denklem (18), araçların kapasite kısıtlamasını belirler ve her bir

aracın toplam yük taşıma kapasitesinin 4 ton sınırını geçmemesini sağlar. Denklem (19), talep karşılama kısıtını açıklamakta ve her dağıtım noktasındaki talebin bir ya da daha fazla araç tarafından tam olarak karşılanmasını garanti etmektedir. Denklem (20) ise, araç çıkış kısıtını tanımlamakta ve her aracın merkezi depodan yalnızca bir kez yola çıkmasını zorunlu hale getirmektedir. Denklem (21), araçların dönüş kısıtlamasını ifade etmekte ve tüm araçların rotalarını tamamladıktan sonra merkezi depoya geri dönmelerini sağlamaktadır. Denklem (22) ise akış dengeleme kısıtını oluşturarak, her dağıtım noktasında araçların giriş ve çıkış dengesini kontrol etmektedir. Denklem (23), teslimat ve rota arasındaki ilişki kısıtını tanımlar ve araçların yalnızca ziyaret ettikleri noktalara ürün teslim etmesini sağlar. Denklem (24) ise her aracın toplam operasyonel maliyetini hesaplar. Denklem (25), araçların yakıt giderlerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Denklem (26) ise amortisman giderlerini, Denklem (27) de şoför masraflarını ayrı bir şekilde ortaya koymaktadır. Ayrıca, Denklem (28) araç kullanım durumunu izleyerek hangi araçların aktif olarak kullanıldığını göstermektedir. Denklem (29), zaman penceresinin alt sınırını ifade eder ve araçların dağıtım noktalarına en erken kabul saatinden önce ulaşmasını engeller. Denklem (30) ise zaman penceresinin üst sınırını tanımlar ve araçların en geç kabul saatinden sonra teslimat yapmalarını önler. Denklem (31), rotalar arasındaki zaman ilişkisini oluşturmakta ve bir aracın belirli bir noktadan ayrıldıktan sonra bir sonraki durağa ne zaman ulaşacağını tespit etmektedir. Denklem (32), hizmet süresi kısıtını ortaya koymakta ve her dağıtım noktası için gerekli olan boşaltma ve belge işlemleri sürelerini modele eklemektedir.

3.3. Matematiksel Modelin Çözülmesi ve Bulgular

Geliştirilen matematiksel model, GAMS Studio (49.6.1) yazılımı aracılığıyla karma tamsayılı programlama tekniği ile uygulanmıştır. Çözüm süreci toplamda 14 saat 38 dakika almıştır ve optimal bir sonuç elde edilmiştir. Hesaplama süreci için 20 çekirdekli bir işlemci kullanılmıştır ve sistem, 64 GB RAM'in yaklaşık %80'ini tüketmiştir. CPLEX çözümleyici tarafından tüm değişkenler için tam sayılı bir

çözüm elde edilmiştir ve bu süreçte yaklaşık 608.156.422 iterasyon yapılmıştır. Bu yüksek iterasyon sayısı, modelin çözüm alanının genişliğini ve problemin kombinatoriyal zorluğunu ortaya koymaktadır. Tasarlanan zaman pencereli araç rotalama modeli için elde edilen en iyi çözümün toplam maliyeti 161.612,88 TL olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, maliyet, mesafe ve zaman unsurlarının aynı anda optimize edilmesiyle elde edilmiştir. Modelin çözümü sonucunda toplamda 7 farklı rota belirlenmiştir ve her bir rotadaki araçların kapasite kullanım oranları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4

GAMS yazılım paket programı ile elde edilen rotalardaki araçların kapasite durumları

---- EQU kapasite Her aracın kapasite sınırı				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1	-INF	4.0000	4.0000	EPS
2	-INF	3.5000	4.0000	.
3	-INF	4.0000	4.0000	EPS
4	-INF	1.0000	4.0000	.
5	-INF	4.0000	4.0000	.
6	-INF	4.0000	4.0000	EPS
7	-INF	3.5000	4.0000	.

Tablo 4'te görüldüğü gibi belirlenen 7 rotadan 1, 3, 5 ve 6 numaralı olanlar araçların tam kapasiteyle hizmet verdiğini göstermektedir. Diğer yandan, 2 ve 7 numaralı rotalardaki araçlar ise toplam kapasitelerinin 500 kg altında çalışmaktadır. Ayrıca, 4 numaralı rota için hizmet veren araçlar yalnızca %25 oranında bir kapasiteyle dağıtım gerçekleştirmektedir. Bu kapasite dağılımı, toplam talebin araç kapasitelerine en uygun şekilde dağıtıldığını ve sistemin genel olarak yüksek bir verimlilikle işlediğini ortaya koymaktadır. Belirlenen yolların ayrıntılı incelemesi, her bir rotanın mesafe bilgileri ile dağıtım noktalarına yapılan teslimat miktarları Tablo 5'te kapsamlı bir şekilde yer almaktadır.

Tablo 5

GAMS yazılım paket programı ile elde edilen rotalar

---- 167 VARIABLE x.L		1	2	3	4	5	6	7
Kastamonu	.Afyonkarahisar						1.000	
Kastamonu	.Ankara	1.000	1.000					
Kastamonu	.Elazığ			1.000				
Kastamonu	.Hatay							1.000
Kastamonu	.Samsun				1.000	1.000		
Adana	.Kastamonu			1.000				
Adana	.Mersin							1.000
Afyonkarahisar	.Antalya		1.000					
Afyonkarahisar	.Aydın						1.000	
Ankara	.Afyonkarahisar		1.000					
Ankara	.İstanbul	1.000						
Antalya	.Kastamonu		1.000					
Aydın	.İzmir						1.000	
Elazığ	.Sanliurfa			1.000				
Giresun	.Rize					1.000		
Hatay	.Osmaniye							1.000
İstanbul	.Tekirdağ	1.000						
İzmir	.Kastamonu						1.000	
Mersin	.Kastamonu							1.000
Ordu	.Giresun					1.000		
Osmaniye	.Adana							1.000
Rize	.Trabzon					1.000		
Samsun	.Kastamonu				1.000			
Samsun	.Ordu					1.000		
Sanliurfa	.Adana			1.000				
Tekirdağ	.Kastamonu	1.000						
Trabzon	.Kastamonu					1.000		

Tablo 5'te yer alan rota analizine göre, GAMS Studio program çıktısında 7 rotanın ayrıntılı bilgileri yer almaktadır. Programın çıktısına göre ilk rota Kastamonu – Ankara – İstanbul – Tekirdağ – Kastamonu şeklindedir. İkinci rota, Kastamonu – Ankara – Afyonkarahisar – Antalya – Kastamonu olarak güzergahını tamamlamaktadır. Üçüncü rota, Kastamonu – Elazığ – Şanlıurfa – Adana – Kastamonu şeklindedir. Dördüncü rota ise sadece

Kastamonu – Samsun – Kastamonu olduğu görülmektedir. Beşinci rota Kastamonu – Samsun – Ordu – Giresun – Rize – Trabzon – Kastamonu şeklindedir. Altıncı rotanın güzergahı, Kastamonu – Afyonkarahisar – Aydın – İzmir – Kastamonu şeklindedir ve son rota olan yedinci rota ise, Kastamonu – Hatay – Osmaniye – Adana – Mersin – Kastamonu şeklindedir. Rotalarda şehirlere yapılan ürün teslim miktarları ise Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6

Rotalarda dağıtım noktalarına yapılan ürün teslim miktarı (kg)

Şehirler	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 4	Rota 5	Rota 6	Rota 7
Adana			2.000				500
Afyonkarahisar		500				2.000	
Ankara	2.000	500					
Antalya		2.500					
Aydın						1.000	
Elâzığ			1.000				
Giresun					1.000		
Hatay							1.000
İstanbul	1.000						
İzmir						1.000	
Mersin							1.000
Ordu					1.000		
Osmaniye							1.000
Rize					1.000		
Samsun				1.000			
Şanlıurfa			1.000				
Tekirdağ	1.000						
Trabzon					1.000		

Tablo 6 incelendiğinde yapılan araştırmada oluşturulan model, kısmi dağıtımlara olanak tanıdığı için Ankara, Afyonkarahisar ve Adana illerinin talepleri iki farklı rota aracılığıyla karşılandığı görülmektedir. Bu durum, araç kapasitelerinin daha verimli bir

şekilde kullanılmasını sağlamış ve toplam rota sayısının iyileştirilmesine yardımcı olmuştur. Ayrıca rotaların katettiği toplam mesafe Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7

Rotaların uzunlukları (km)

Rotalar	Rota Güzergahı	Toplam Mesafe (km)
1	Kastamonu-Ankara-İstanbul-Tekirdağ-Kastamonu	1470 km
2	Kastamonu-Ankara-Afyonkarahisar-Antalya-Kastamonu	1571 km
3	Kastamonu-Elâzığ-Şanlıurfa-Adana-Kastamonu	2154 km
4	Kastamonu-Samsun-Kastamonu	580 km
5	Kastamonu-Samsun-Ordu-Giresun-Rize-Trabzon-Kastamonu	1392 km
6	Kastamonu-Afyonkarahisar-Aydın-İzmir-Kastamonu	1792 km
7	Kastamonu-Hatay-Osmaniye-Adana-Mersin-Kastamonu	1843 km

Tablo 7 incelendiğinde rotaların toplam uzunlukları km cinsinden verilmiştir. Tabloya göre en uzun rota Kastamonu – Elâzığ – Şanlıurfa – Adana – Kastamonu rotası olan 3.rotadır ve toplam 2154 km yol katetmiştir. En kısa rota ise Kastamonu – Samsun – Kastamonu rotası olan 4. rotadır ve toplam rota uzunluğu 580

km'dir. Rotaların toplam uzunluğu ise 10.802 km olarak bulunmuştur.

Zaman pencereli araç rotalama probleminin doğası gereği, her dağıtım noktasına giriş ve çıkış saatlerinin belirlenmesi son derece önemlidir. Oluşturulan rotaların zaman çizelgesi detayları Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8

GAMS yazılım paket programı ile elde edilen rotalardaki noktalara giriş ve çıkış saatleri

Rotalar	Güzergâh	Giriş Saati	Çıkış Saati
Rota 1	Kastamonu	...	04:16
	Ankara	07:30	08:30
	İstanbul	17:00	18:00
	Tekirdağ	23:00	00:00
	Kastamonu	08:34	...
Rota 2	Kastamonu	...	04:16
	Ankara	07:30	08:30
	Afyonkarahisar	13:06	14:06
	Antalya	18:00	19:00
	Kastamonu	05:24	...
Rota 3	Kastamonu	...	00:00
	Elâzığ	10:39	11:39
	Şanlıurfa	16:21	17:21
	Adana	22:00	23:00
	Kastamonu	08:10	...
Rota 4	Kastamonu	...	00:00
	Samsun	03:52	04:52
	Kastamonu	08:44	...
Rota 5	Kastamonu	...	00:00
	Samsun	03:52	04:52
	Ordu	08:36	09:36
	Giresun	10:11	11:11
	Rize	14:00	15:00
	Trabzon	16:00	17:00
	Kastamonu	01:17	...
Rota 6	Kastamonu	...	02:21
	Afyonkarahisar	09:00	10:00
	Aydın	17:19	18:19
	İzmir	20:00	21:00
	Kastamonu	07:58	...
Rota 7	Kastamonu	...	00:00
	Hatay	11:42	12:42
	Osmaniye	15:55	16:55
	Adana	18:05	19:05
	Mersin	20:00	21:00
	Kastamonu	06:04	...

Tablo 8'de yapılan zaman analizinde, depo çıkış saatleri, dağıtım noktalarına varış ve çıkış saatleri ile depoya geri dönüş saatleri ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Her bir dağıtım noktasında 1 saatlik servis süresi modele eklenmiş olup, zaman penceresi kısıtlarının tamamının sağlandığı doğrulanmıştır.

Araştırmanın maliyet analizi, işletmenin karar verme süreçleri açısından büyük bir önem taşımaktadır. Modelin detaylı maliyet dağılımı Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9

GAMS yazılım paket programı ile elde edilen maliyetler tablosu

	ROTA 1	ROTA 2	ROTA 3	ROTA 4	ROTA 5	ROTA 6	ROTA 7	TOPLAM
Yakıt Maliyeti	8467,2	9048,96	12407,04	3340,8	8017,92	10327,68	10615,68	62225,28
Amortisman Maliyeti	4704	5027,2	6892,8	1856	4454,4	5737,6	5897,6	34569,6
Şoför Maliyeti	8820	9426	12924	3480	8352	10758	11058	64818
TOPLAM MALİYET	21991,2	23502,16	32223,84	8676,8	20824,32	26823,28	27571,28	161612,88

Tablo 9'da yer alan kapsamlı maliyet analizine göre, birinci rotanın toplam maliyeti 21.991,20 TL, ikinci rotanın maliyeti 23.502,16 TL, üçüncü rotaya ait toplam gider 32.223,84 TL, dördüncü rota için toplam harcama 8.676,80 TL olarak belirlenmiştir. Beşinci rotanın maliyeti ise 20.824,32 TL'dir; altıncı rotanın toplam maliyeti 26.971,28 TL olarak belirlenmiş olup, yedinci rota 27.421,28 TL tutarındadır.

Maliyet bileşenleri göz önünde bulundurulduğunda, toplam yakıt gideri 62.225,28 TL, amortisman masrafları 34.569,60 TL ve sürücü maliyetleri ise 64.818,00 TL olmuştur. Zaman pencereli araç rotalama problemindeki ana hedef olan toplam maliyetin en aza indirilmesi 161.612,88 TL ile başarıyla elde edilmiştir.

Yakıt giderlerinin toplam masraflar içerisinde %38,5 oranında bir paya sahip olması, enerji verimliliği bakımından kayda değer bir bulgudur. Şoför maliyetlerinin toplam maliyet içinde %40,1 oranıyla en yüksek paya sahip olması, personel yönetiminin rota planlamasında ne denli önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Diğer yandan, amortisman giderlerinin %21,4'lük orana ulaşması ise araç filosunun etkin kullanımının ne derece hayati olduğunu vurgulamaktadır.

Bu detaylı analizin bulguları, oluşturulan zaman pencereli araç rotalama modelinin XYZ İşletmesi'nin lojistik süreçlerinde kayda değer iyileşmeler sağladığını ve benzer tarım işletmeleri için geçerli bir çözüm sunabileceğini ortaya koymaktadır.

3.4. Model Sonuçlarının Genel Değerlendirmesi

Geliştirilen zaman pencereli araç rotalama problemi modeli, XYZ İşletmesi'nin 18 farklı şehre gerçekleştirdiği dağıtım işlemlerinde başarıyla kullanılmıştır. Modelin çözümüyle birlikte elde edilen toplam maliyet 161.612,88 TL olarak gerçekleşmiş olup, bu sonuç 7 farklı rotanın en uygun şekilde planlanmasıyla elde edilmiştir. Bu bulgu, tarımsal gıda sektöründe zaman pencereli araç rotalama problemlerinin etkili bir şekilde çözülebileceğini ortaya koymaktadır.

3.4.1. Rota Verimliliği ve Kapasite Analizi

Oluşturulan 7 rotanın analizi incelendiğinde; toplam 24.000 kg ürün dağıtımı için kg başına maliyet 6,73 TL olarak hesaplanmıştır. Tablo 4'te görüldüğü üzere rotaların 4'ünde (%57) tam kapasite kullanımı sağlanırken, rotanın 3'ünde %87,5 kapasite kullanımı ve kalan 1 rotada ise %25'lik kapasite kullanımı sağlanmıştır. Bu durum, model tarafından araç kapasitelerinin yüksek verimlilikle kullanıldığını ve optimal kaynak dağılımının gerçekleştirildiğini göstermektedir. Maliyet bileşenleri açısından değerlendirildiğinde, şoför maliyetlerinin %40,1, yakıt maliyetlerinin %38,5 ve amortisman maliyetlerinin %21,4 pay aldığı tespit edilmiştir.

3.4.2. Modelin Uygulanabilirlik Değerlendirmesi

Hazırlanan yedi rotanın değerlendirilmesi sonucunda, toplam 24.000 kg ürün dağıtımı için maliyetin kilogram başına 6,73 TL olduğu tespit edilmiştir. Tablo 4'ten anlaşıldığı üzere, dört rotada (%57) tam kapasite kullanımı elde edilirken, 2 rotada (%28,5) kapasitenin %87,5'lik kısmı, kalan 1 rotada (%14,5) ise kapasitenin %25'lik kısmı kullanılmaktadır. Bu durum, modelin araç kapasitelerinin etkin bir şekilde kullanıldığını ve kaynakların en iyi şekilde dağıtıldığını ortaya koymaktadır. Maliyet unsurları incelendiğinde, şoför giderlerinin toplam maliyetin %40,1'ini, yakıt giderlerinin %38,5'ini ve amortisman giderlerinin ise %21,4'ünü oluşturduğu belirlenmiştir.

3.5. Duyarlılık Analizi

Geliştirilen zaman pencereli araç rotalama problemi modelinin güvenilirliğini ölçmek ve önemli parametrelerin sistem üzerindeki etkilerini incelemek için detaylı bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu analiz, modelin parametrelerindeki değişikliklerin toplam maliyet, kullanılan rota sayısı ve kapasite kullanımına etkilerini sistematik bir şekilde ele almaktadır. Duyarlılık analizi, işletme yöneticilerinin çeşitli piyasa koşullarında stratejik kararlar almaları için önemli parametreleri belirler ve model sonuçlarının farklı senaryolar altında ne kadar sağlam olduğunu sınamaktadır.

3.5.1. Yakıt Fiyatı Duyarlılık Analizi

Lojistik süreçlerde yakıt maliyetleri, toplam maliyetin %38,5'ini oluşturduğu için, yakıt fiyatlarındaki dalgalanmaların sistem performansı üzerindeki etkisini incelemek oldukça önemlidir. Bu çalışmada, 48 TL/litre olan yakıt fiyatı üzerinden %20 ve %50 oranlarında artış ve azalış senaryoları incelenmiştir.

Tablo 10

Yakıt fiyatı değişiminin toplam maliyet üzerindeki etkisi

Yakıt Fiyatı (TL/litre)	Değişim Oranı (%)	Toplam Maliyet (TL)	Maliyet Değişimi (%)	Kg Başına Maliyet (TL)
38,40	-20%	151.226,68	-6,43%	6,30
43,20	-10%	156.419,78	-3,21%	6,52
48,00	0%(Baz)	161.612,88	0%	6,73
52,80	+10%	166.806,98	+3,21%	6,95
57,60	+20%	171.999,08	+6,43%	7,17
72,00	+50%	187.576,48	+16,07%	7,82

Tablo 10'a göre, yakıt fiyatlarının %20 artışı toplam maliyette %6,43'lük (10.386,20 TL) bir artışa yol açmaktadır. Yakıt fiyatlarının %50 oranında yükselmesi halinde, toplam maliyet %16,07 artarak 187.576,48 TL'ye ulaşacaktır. Bu durum, kilogram başına dağıtım maliyetinin 6,73 TL'den 7,82 TL'ye çıkması demektir. Hassasiyet katsayısı 0,32 olarak belirlenmiştir; bu da yakıt

fiyatlarında meydana gelen %1'lik bir artışın toplam maliyeti %0,32 oranında artıracığını göstermektedir.

3.5.2. Talep Miktarı Değişimi Duyarlılık Analizi

Tarım ürünleri pazarında mevsimsel dalgalanmalar ve piyasa koşulları nedeniyle talep miktarlarında belirgin farklılıklar gözlemlenebilir. Bu sebeple, toplam 24.000 kg olarak belirlenen mevcut talep miktarının %30 oranında artması veya azalması durumunda sistemin performansı incelenmiştir.

Tablo 11

Talep miktarı değişiminin sistem performansı üzerindeki etkisi

Toplam Talep (kg)	Değişim Oranı (%)	Gerekli Rota Sayısı	Toplam Maliyet (TL)	Ortalama Kapasite Kullanımı (%)	Kg Başına Maliyet (TL)
16.800	-30%	5	118.447,52	84,0%	7,05
19.200	-20%	6	138.926,44	80,0%	7,24
21.600	-10%	6	151.184,32	90,0%	7,00
24.000	0%(Baz)	7	161.612,88	85,7%	6,73
26.400	+10%	7	173.892,64	94,3%	6,59
28.800	+20%	8	187.248,96	90,0%	6,50
31.200	+30%	8	201.847,68	97,5%	6,47

Tablo 11'deki analizde dikkat çeken önemli bulgular ortaya çıkmıştır. Talep miktarındaki %30'luk düşüş, toplam maliyette %26,7 oranında bir azalma ile sonuçlanırken, kilogram başına maliyet ise 6,73 TL'den 7,05 TL'ye yükselmektedir. Bu durum, sabit maliyetlerin daha düşük bir talep miktarına yayılmasından dolayı ölçek ekonomisinin kaybolması ile ilgilidir. Buna karşın, talepteki %30'luk artış toplam maliyeti %24,9 oranında yükseltirken, kilogram başına maliyeti 6,47 TL'ye indirmektedir. En dikkat çekici sonuç, talebin %30'u aştığı durumlarda 8 rotaya gereksinim

duyulması ve ortalama kapasite kullanımının %97,5 seviyesine çıkmasıdır.

3.5.3. Araç Kapasitesi Etkisi Duyarlılık Analizi

Araç kapasitesinin sistem verimliliği üzerindeki etkilerini incelemek için mevcut 4.000 kg kapasiteli araçlar yerine farklı kapasitelerdeki araçların kullanılması durumu incelenmiştir. Bu analiz, işletmelerin araç yatırımıyla ilgili kararlarına yol göstermektedir.

Tablo 12

Araç kapasitesi değişiminin sistem verimliliği üzerindeki etkisi

Araç Kapasitesi (kg)	Değişim Oranı (%)	Gerekli Rota Sayısı	Toplam Mesafe (km)	Toplam Maliyet (TL)	Maliyet Değişimi (%)	Kg Başına Maliyet (TL)
3.000	-25%	9	13.284	198.754,32	+22,98%	8,28
3.500	-12,5%	8	12.168	182.396,16	+12,87%	7,60
4.000	0%(Baz)	7	10.802	161.612,88	0%	6,73
4.500	+12,5%	6	9.876	147.892,48	-8,49%	6,16
5.000	+25%	5	9.254	138.447,20	-14,32%	5,77
6.000	+50%	4	8.632	129.284,16	-20,01%	5,39

Tablo 12'de yer alan bulgular, araç kapasitesinin sistemin performansı üzerinde kayda değer bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Araç kapasitesi 3.000 kg'a düşürüldüğünde, toplamda 9 rotaya ihtiyaç duyulmakta ve bunun sonucunda toplam maliyet %22,98 artarak 198.754,32 TL'ye yükselmektedir. Bu durum, kilogram başına maliyetin 6,73 TL'den 8,28 TL'ye çıktığını göstermektedir. Öte yandan, eğer araç kapasitesi 6.000 kg'a arttırılırsa sadece 4 rota ile dağıtım gerçekleştirilebilmekte ve toplam maliyet %20,01 oranında azalarak 129.284,16 TL olmaktadır. En dikkat çeken bulgu, araç kapasitesindeki %50 oranındaki artışın

toplam mesafeyi 10.802 km'den 8.632 km'ye düşürmesidir. Aynı zamanda kilogram başına maliyet de 5,39 TL'ye gerilemiştir. Bu veriler, daha büyük kapasiteli araçların lojistik verimliliği konusunda önemli faydalar sunduğunu göstermektedir.

3.5.4. Filo Ölçekleme Analizi

Mevcut kullanılmakta olan araç filosunda araç sayısı 7 iken yeni araç yatırımı yapıldığında toplam maliyet değişimi ile araç sayısının azaltılması durumundaki toplam maliyet durumu incelenmiştir.

Tablo 13

Araç sayısı değişimi ile maliyet üzerindeki etkisi

Araç Sayısı	Kullanılan Araç	Toplam Maliyet (TL)	Rota Sayısı	Ortalama Kapasite Kullanımı	Kg Başlı Maliyet (TL)	Toplam Maliyet Değişimi
5	5	175.874,20	5	96%	7,33	108,824371
6	6	168.192,64	6	91%	7,01	104,071309
7 (Baz)	7	161.612,88	7	85%	6,73	100
8	7	159.324,48	7	78%	6,64	98,5840237
9	7	158.811,20	7	73%	6,62	98,2664253

Tablo 13'e göre filo ölçekleme analizi yapılmış ve sistem üzerindeki araç sayısının değişim durumları incelenmiştir. Araç sayısı 7'den 6'ya düşürüldüğünde maliyet 168.192,64 TL olmaktadır. Kullanılan ortalama araç kapasite %91'e çıkmaktadır ve rota sayısı 6 olmaktadır. Maliyet değişimi ise yaklaşık %4 artış oluştururken ortalama km başı maliyet 7,01 TL'dir. Araç sayısı 5'e düşürüldüğünde ise maliyet 175.874,20 TL olmaktadır. Kullanılan ortalama araç kapasitesi %96'ya çıkarken rota sayısı 5 olmaktadır. Kg başı maliyet 7,33 TL olur iken toplam maliyet %8,8 artmaktadır. Yatırım yapılarak filoya yeni araç alınması durumunda ise rota sayısında herhangi bir değişiklik meydana gelmemektedir. Maliyetler üzerinde de ciddi bir azalış yaratmaz iken 7 araç sayısı optimum düzeyde olduğu anlaşılmaktadır.

3.6. Karbon Salınım Analizi

ZPARP modeli için ayrıca karbon salınım analizi yapılmış ve tabloda gösterilmiştir.

Tablo 14

Karbon salınım analizi

Araç	Rota Uzunluğu	Yakıt Tüketimi (Lt)	CO ₂ Emisyonu (Kg)
1	1470	176,4	472,752
2	1571	188,52	505,2336
3	2154	258,48	692,7264
4	580	69,6	186,528
5	1392	167,04	447,6672
6	1792	215,04	576,3072
7	1843	221,16	592,7088
Toplam	10802	1296,24	3473,9232

Tablo 14'e göre ZPARP için karbon salınım analizi yapılmış araç bazında ölçülen emisyon değerleri gösterilmiştir. 3 nolu araç %19,94'lük pay ile 7 araç içinde en çok emisyon değerine sahiptir. 4 nolu araç ise %5,37'lik bir pay ile en düşük emisyon değerine sahiptir. Toplamda 7 araç 10.800 km yol yapmış ve yaklaşık 1.296,24 litre yakıt tüketmiştir. 7 aracın toplam emisyon değeri ise 3.473,92 kg'dır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada literatürdeki zaman pencereli araç rotalama için belirlenen varsayımlar kabul edilmiş iki maddesi değiştirilerek bu çalışma için özel uyarlanmıştır. Dağıtım kanalından çıkış zamanı 'o' olarak belirlenen varsayım değiştirilerek dağıtım noktalarının ilk açılış saatine denk gelecek şekilde esnek bir başlangıç zamanı benimsenmiştir. Ayrıca oluşturulan modelde parçalı ürün dağıtımına izin verilmiş ver her dağıtım noktasına yalnız bir araç

gider ve birden fazla araç hizmet veremez varsayımları esnetilmiştir. Böylelikle hem araç kapasitesi etkin kullanılmış hem de maliyet, zaman ve mesafe optimizasyonuna olumlu yansımaları olmuştur. Yine literatürdeki sert zaman pencereli araç rotalama problemi yerine esnek zaman pencereli araç rotalama problemi yöntemi modelde uygulanmıştır.

Yapılan bu çalışma kapsamında tarım ve gıda sektöründe zaman pencereli araç rotalama problemine ilişkin detaylı bir matematiksel model geliştirilmiş ve Kastamonu'nun Taşköprü ilçesinde sarımsak üreten bir işletmenin verilerine dayanarak uygulanmıştır. Araştırma başarıyla 18 ayrı il arasında aylık 24 ton sarımsak dağıtımı için zaman, maliyet ve mesafenin en verimli biçimde optimize edilmesini sağlamıştır.

ZPARP modelinin tasarımı için GAMS Studio (49.6.1) yazılım paketi kullanılarak optimal sonuca 14 saat 38 dakika içinde ulaşılmıştır. Modelin çözümü sonucunda elde edilen toplam maliyet 161.612,88 TL'dir ve toplamda yedi ayrı rota belirlenmiştir. Oluşturulan rotaların toplam uzunluğu 10.802 km olup, araç kapasitelerinin %75-100 arasında etkin kullanım sağlanmıştır. Rotaların %57'sinde tam kapasite kullanılırken, zaman penceresi kısıtları dağıtım noktalarında başarılı bir şekilde karşılanmıştır.

Maliyet yapısının detaylı incelenmesi lojistik operasyonlarında maliyet dağılımını ortaya koymaktadır: Şoför maliyetlerinin toplam maliyetin %40,1'ini oluşturan 64.818 TL olması personel yönetiminin ne kadar kritik olduğunu göstermektedir; yakıt giderlerinin %38,5'ini oluşturan 62.225 TL enerji verimliliği konusunda ne kadar önemli olduğunu vurgularken; amortisman maliyetlerinin %21,4'ünü oluşturan 34.569 TL araç filosu yönetiminin etkisini belirtmektedir. Kilogram başına ortalama dağıtım maliyeti ise 6,73 TL olarak hesaplanarak tarımsal ürün lojistiği için rekabetçi bir seviyede olduğu görülmüştür.

Tarımsal gıda sektöründe ürünlerin zamanında teslim edilmesi büyük önem taşımaktadır çünkü her müşterinin teslim alma saatleri değişiklik gösterebilir ve bu duruma esneklik gösterilerek en iyi çözüm sağlanmaktadır. Modelde kısmi dağıtımına izin verilmiştir ve Ankara, Afyonkarahisar ve Adana illerinin talepleri için iki ayrı güzergâh belirlenmiştir. Bu uygulama karmaşıklığı artırabilir ancak araç kapasitesinin daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Uygulanabilirlik analizi sonucuna göre en uzun rota 2.154 km'dir ve yaklaşık 11,5 saat sürüş gerektirirken iki şoför sistemi kullanarak yasal sınırlar içinde kalındığı görülmektedir. Tüm rotaların zaman penceresine uygun şekilde tamamlanması uygulamanın pratikte uygulanabilir olduğunu desteklemektedir.

Duyarlılık analizi sonucunda modelin farklı piyasa koşulları altında güvenilirliğinin doğrulandığı görülmüştür. Yakıt

fiyatlarındaki %20 artışın toplam maliyetlerde %6,43 artışı tetiklemesi (duyarlılık katsayısı 0,32), sistemin enerji fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı dengeli bir tepki verdiğini göstermektedir. Talep miktarındaki %30'luk değişimlerin ölçek ekonomisi etkisine sahip olması ve araç kapasitesinin 6.000 kg'a yükseltilmesinin sonucunda %20 maliyet tasarrufu sağlanmasıyla modelin çeşitli işletme senaryolarında etkin performans sergilediği kanıtlanmıştır. Filo ölçekleme analizi araç sayısının düşürülmesi ile maliyetlerde ortalama %4 artış yarattığı görülmektedir. Ayrıca model için karbon salınım analizi yapılmış ve gıda sektörü için ideal değer olduğu tespit edilmiştir. Avrupa ortalama 0,3-0,6 arası kabul edildiğinde modelin ortalama 0,0134 kg'dır. Ancak araç yakıt türü elektrik gibi alternatiflere yöneltildiği zaman bu oranların çok daha aşağıya düşeceği bilinmektedir.

Bu çalışmanın belirli sınırlılıkları bulunmakta olup model deterministik talep yapısını varsaymakta ve stokastik talep değişkenliği dikkate almamaktadır. Ayrıca sarımsağın özel muhafaza koşulları ve soğuk zincir gereksinimleri modele dahil edilmemiştir.

Gelecek araştırmalar için öneriler arasında soğuk zincir kısıtlarının modele entegrasyonu, stokastik talep yapısının dikkate alınması ve gerçek zamanlı rota optimizasyonunun sağlanması bulunmaktadır. Ayrıca yeşil lojistik modellerinin sürdürülebilirlik kriterlerini içermesi ve makine öğrenmesine dayalı tahmin algoritmalarının entegrasyonunu içeren çok boyutlu optimizasyon yaklaşımlarının geliştirilmesine odaklanılmalıdır. Bu çalışmadan elde edilen modelin benzer çalışmalarda kullanılması için araştırmacılara ve tarımsal gıda sektöründeki firmalara pratik bir rehberlik sağlama potansiyeli bulunmaktadır.

Kaynakça

- Atmaca, E. (2012). Bir Kargo Şirketinde Araç Rotalama Problemi. *Tübbav Bilim Dergisi*, 5(2): 12-27.
- Boz, E., Çalık, A. ve Şahin, Y. (2023). Yeşil Zaman Pencereli ve Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemlerinin Metasezgisel Yöntemlerle Çözümü. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(2): 757-770. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1180965>
- Chen, H., Wang, W., Jia, L. and Wang, H. (2024). Research on Time-Varying Path Optimization for Multi-Vehicle Type Fresh Food Logistics Distribution Considering Energy Consumption. *Scientific Reports*, 14: 26639. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78639-1>
- Chen, G., Gao, J. and Chen, D. (2025). Research on Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on Improved Genetic Algorithm and Ant Colony Algorithm. *Electronics*, 14(4): 647. <https://doi.org/10.3390/electronics14040647>
- Chung, S. H., Sah, B. and Lee, J. (2020). Optimization for Drone and Drone-Truck Combined Operations: A Review of The State of The Art and Future Directions. *Computers and Operations Research*, 123: 105004. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105004>
- Clarke, G. ve Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4): 568-581. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
- Cömert, S. E., Yazgan, H. R. ve Görgülü, N. (2019). Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi İçin İki Aşamalı Bir Çözüm Yöntemi Önerisi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 31(2): 107-117.
- Çetin, O. ve Özçakar, N. (2019). Akaryakıt Dağıtımında Araç Rotalama Problemi İçin Bir Başlangıç Çözümü. *Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 21(2): 625-640.
- Çetin, S. ve Gencer, C. (2010). Kesin Zaman Pencereli-Eş Zamanlı Dağıtım Toplamalı Araç Rotalama Problemi: Matematiksel Model. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(3): 465-474.
- Çiçekli, G. U. ve Cihangir, E. (2019). Dubai Çöp Toplama Araç Rotalama Problemi İçin Genetik Algoritma. *Business and Organization Research*, 8, 156-167.
- Dağıstanlı, A. H. (2024). Çok Ürünli Çok Depolu Araç Rotalama Problemi: Askeri İlaç Fabrikası Örneği. *Politeknik Dergisi*, 27(1): 89-102.
- Dantzig, G. B. and Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1): 80-91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- Dedetürk, B. K., Kolukisa, B. ve Özmen, M. (2023). Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemleri İçin Kümeleme Temelli Klonal Seçim Algoritması. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(21): 307-320.
- Düzakın, E. ve Demircioğlu, M. (2009). Araç Rotalama Problemleri ve Çözüm Yöntemleri. *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(2): 68-87.
- Faramarzadeh, M. and Akpınar, Ş. (2023). A Grey Wolf Optimizer Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and Simultaneous Pick-Ups and Deliveries. *Endüstri Mühendisliği*, 34(2): 141-160.
- Gendreau, M., Laporte, G. and Séguin, R. (1996). Stochastic Vehicle Routing. *European Journal of Operational Research*, 88(1): 3-12. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00050-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00050-X)
- Goel, A. and Gruhn, V. (2008). A General Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 191(3): 650-660. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.047>
- Han, H. and Cueto, P. E. (2015). Waste Collection Vehicle Routing Problem: Literature Review. *Promet-Traffic and Transportation*, 27(4): 345-358. <https://doi.org/10.7307/ptt.v27i4.1616>
- Hoogeboom, M., Adulyasak, Y., Dullaert, W. and Jaillet, P. (2021). The Robust Vehicle Routing Problem with Time Window Assignments. *Transportation Science*, 55(2): 395-413. <https://doi.org/10.1287/trsc.2020.1013>
- Kalaycı, B. C. ve Yılmaz, Y. (2023). Elektrikli Araç Rotalama Problemleri Üzerine Bir Literatür İncelemesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(4): 412-425. <https://doi.org/10.5505/pajes.2023.49769>
- Kantasa-ard, A., Chargui, T., Bekrar, A., AitElCadi, A. and Sallez, Y. (2023). Dynamic Sustainable Multiple-Depot Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery in the Context of the Physical Internet. *Journal of International Logistics and Trade*, 21(3): 110-134.
- Kara, İ., Kara, B. Y. and Yetis, M. K. (2008). Cumulative Vehicle Routing Problems. *Vehicle Routing Problem*, 6: 85-98.
- Keskintürk, T., Topuk, N. ve Özyeşil, O. (2015). Araç Rotalama Problemleri ve Çözüm Yöntemleri. *İşletme Bilimi Dergisi*, 3(2): 77-107.
- Li, C.-L., Simchi-Levi, D. and Desrochers, M. (1992). On the Distance Constrained Vehicle Routing Problem. *Operations Research*, 40(4): 790-799. <https://doi.org/10.1287/opre.40.4.790>
- Li, X., Liu, Z. and Zhang, Y. (2025). Research on Vehicle Routing Problem with Time Window Based on Improved Genetic Algorithm. *Scalable Computing: Practice and Experience*, 26(1): 123-135.
- Marinakos, Y., Marinaki, M. and Migdalas, A. (2019). A Multi-Adaptive Particle Swarm Optimization for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Information Sciences*, 481: 311-329. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.01.002>
- McCullough, E. B. and Matson, P. A. (2024). The Role of Midstream Actors in Advancing the Sustainability of Agri-Food Supply Chains. *Nature Sustainability*, 7, 245-256. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01291-2>
- Min, H. (1989). The Multiple Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-Up Points. *Transportation Research Part A: General*, 23(5): 377-386. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(89\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0191-2607(89)90085-X)
- Polimeni, A., Donato, A. and Belcore, O. M. (2024). Urban Freight Distribution with Electric Vehicles: Comparing Some Solution Procedures. *Frontiers in Future Transportation*, 5: 1491799. <https://doi.org/10.3389/ffutr.2024.1491799>
- Prajapati, D., Chan, F. T. S., Daultani, Y. and Pratap, S. (2022). Sustainable Vehicle Routing of Agro-Food Grains in the E-Commerce Industry. *International Journal of Production Research*, 60(22): 6910-6927. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2034192>
- Praveen, V., Keerthika, P., Sivapriya, G., Sarankumar, A. and Bhasker, B. (2022). Vehicle Routing Optimization Problem: A Study on Capacitated Vehicle Routing Problem. *Materials Today: Proceedings*, 64: 670-674. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.087>

- Reyes, D., Savelsbergh, M. and Toriello, A. (2017). Vehicle Routing with Roaming Delivery Locations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80: 71-91. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.04.003>
- Sezen, K. H. ve Çam, N. Ö. (2018). Toplam Bekleme Süresini Enküçükleme Amaçlı Bir Araç Rotalama Problemi. *International Journal of Social Inquiry*, 11(1): 63-82.
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 35(2): 254-265. <https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254>
- Subramanian, A., Uchoa, E. and Ochi, L. S. (2010). New Lower Bounds for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Experimental Algorithms: 9th International Symposium, SEA 2010* (ss. 276-287). Springer.
- Şehitoğlu, A. ve Ağayeva, Ç. (2022). Homojen ve Heterojen Filolu, Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi İçin Bir Uygulama. *Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1): 9-19.
- Topaloğlu, D., Polat, O. ve Kalaycı, C. B. (2023). Çok Kompartımanlı Heterojen Filolu Zaman Pencereli Araç Rotalama Probleminin Çözümü İçin Sezgisel Algoritmalar. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(8): 870-884.
- Toru, E. ve Yılmaz, G. (2023). Günlük Planlanmış Bakım ve Onarım Servis Planlaması İçin Zaman Pencereli Birçok Depolu Araç Rotalama Problemi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(8): 913-919.
- Toth, P. and Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Tüzemen, A. ve Yıldız, Ç. (2019). A Solution Proposal to Vehicle Routing Problem with Integer Linear Programming: a Distributor Company Sample. *International Journal of Contemporary Economics and Administrative Sciences*, 9(1): 46-78
- Wang, S., Tao, F., Shi, Y. and Wen, H. (2024). A Two-Echelon Multi-Trip Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows for Fresh E-Commerce Logistics Under Front Warehouse Mode. *Systems*, 12(6): 205. <https://doi.org/10.3390/systems12060205>.
- Worasan, K., Sethanan, K., Moonsri, K. and Golinska-Dawson, P. (2022). The Multi-Product Vehicle Routing Problem with Cross-Docking: A Novel Strategy Hybrid Bat Algorithm for Industry 3.5 in Thailand's food industry. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 27(2): 284-308. <https://doi.org/10.1080/13675567.2022.2074381>.
- Yazgan, H. R. ve Büyükyılmaz, R. G. (2017). Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemine Sezgisel Bir Çözüm Yaklaşımı. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2): 436-449.
- Yıldız, Ç. ve Tüzemen, A. (2018). Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemine Dal-Kesme Algoritmasıyla Bir Çözüm Önerisi. 3. Lisansüstü İşletme Öğrencileri Sempozyumu- Tokat, 544 - 556
- Yurdakul, K., Alakaş, M. H. ve Eren, T. (2021). Evde Sağlık Hizmetlerinin Planlanması: Araç Rotalama ve Çizelgeleme. *Journal of Turkish Operations Management*, 3(2): 1456-1470.
- Zhang, Y., Li, X. and Zhou, X. (2020). Optimization of Transportation Routing Problem for Fresh Food in Time-Varying Road Network: Considering Both Food Safety Reliability and Temperature Control. *PLOS ONE*, 15(7): eo235950. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235950>.