



Research Article

REGIONAL DISTRIBUTION PLANNING IN POSTAL SERVICES: A CAPACITY-CONSTRAINED P-MEDIAN AND VEHICLE ROUTING APPROACH

POSTA HİZMETLERİNDE BÖLGESEL DAĞITIM PLANLAMASI: KAPASİTE KISITLI P-MEDYAN VE ARAÇ ROTALAMA YAKLAŞIMI

Berrin Dal ¹ Yusufcan Özkayit ²

¹ Öğr. Gör. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, berrin.dal@gop.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2337-7498

² Arş. Gör., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, yusufcan.ozkayit@gop.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9276-9102

Article Info:

Received: December 8, 2025

Revised: December 25, 2025

Accepted: December 25, 2025

Keywords:

postal services
regional distribution planning
capacity-constrained p-median
vehicle routing problem

Anahtar Kelimeler:

posta hizmetleri
bölgesel dağıtım planlaması
kapasite kısıtlı p-medyan
araç rotalama problemi

DOI:10.46238/jobda.1838159

ABSTRACT

Efficient planning of daily deliveries to hundreds of addresses in postal services is of critical importance for reducing logistics costs and improving service quality. In this study, a distribution area is divided into eight regions using a capacity-constrained p-median model-based regional clustering approach, assuming that each region is served by a vehicle with a capacity of 8 m³. Using point-based real delivery data (geographical locations, letter and parcel volumes) together with the inter-point distance matrix, eight median locations and their corresponding clusters are obtained through optimization using the CBC (Coin-or Branch-and-Cut) solver. As a result of the clustering process, the total delivery volume in each region is balanced so as not to exceed the 8 m³ vehicle capacity constraint. Subsequently, a Vehicle Routing Problem (VRP) is formulated for each region, and the shortest delivery routes are determined using the Google OR-Tools library. The results indicate that a total of 1,220 delivery points are assigned to eight regions, with regional delivery volumes ranging between approximately 3.45 and 7.90 m³, and route lengths for each vehicle varying between approximately 11.5 and 20.3 km. The proposed approach is further analyzed by visualizing the regions on a map and presenting representative delivery routes. The findings demonstrate that the capacity-constrained p-median approach effectively distributes the workload of postal delivery services across regions and enhances overall distribution efficiency through optimized routing within each region. Finally, potential field applications of the proposed method and directions for future improvements are discussed.

Öz

Posta hizmetlerinde günlük olarak yüzlerce adrese yapılan teslimatların etkin biçimde planlanması, lojistik maliyetlerin azaltılması ve hizmet kalitesinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, bir dağıtım alanı kapasite kısıtlı p-medyan modeli temelli bölgesel kümeleme yaklaşımı kullanılarak 8 bölgeye ayrılmış ve her bir bölgenin 8 m³ kapasiteli bir araç tarafından hizmet alacağı varsayılmıştır. Çalışmada nokta tabanlı gerçek teslimat verileri (coğrafi konumlar, mektup ve kargo hacimleri) ile noktalar arasındaki mesafe matrisi kullanılmış; CBC (Coin-or Branch-and-Cut) çözücüsü aracılığıyla gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda 8 adet medyan nokta ve bu noktalara atanan kümeler elde edilmiştir. Kümeleme sonucunda her bölgedeki toplam teslimat hacmi, araç kapasitesi olan 8 m³'ü aşmayacak şekilde dengelenmiştir. Bunu takiben, her bölge için ayrı Araç Rotalama Problemi (VRP) modellenmiş ve Google OR-Tools kütüphanesi kullanılarak en kısa teslimat rotaları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, toplam 1220 teslimat noktasının 8 bölgeye ayrıldığını; bölgesel teslimat hacimlerinin yaklaşık 3,45–7,90 m³, araç rota uzunluklarının ise yaklaşık 11,5–20,3 km aralığında değiştiğini göstermektedir. Yöntem, bölgelerin harita üzerinde görselleştirilmesi ve örnek rotaların sunulması yoluyla analiz edilmiştir. Bulgular, kapasite kısıtlı p-medyan yaklaşımının posta dağıtımında iş yükünü bölgeler arasında dengeli biçimde paylaştırabildiğini ve her bölge içinde optimize edilmiş rotalar sayesinde genel dağıtım verimliliğini artırdığını ortaya koymaktadır. Son bölümde ise yöntemin saha uygulamaları ve gelecekte yapılabilecek iyileştirmelere ilişkin değerlendirmelere yer verilmiştir. © 2024 JOBDA All rights reserved

1 | GİRİŞ

Günümüzün büyük şehirlerinde ve geniş hizmet alanlarında posta ve kargo dağıtım sistemleri, yoğun ve karmaşık son kilometre lojistik operasyonlarını içermektedir. Artan günlük teslimat hacimleri, dağıtım noktalarının coğrafi olarak dağılık yapısı ve hizmet seviyesine ilişkin beklentilerin yükselmesi, dağıtım planlamasını giderek daha zor hâle getirmektedir. Nüfus artışı, trafik sıkışıklığı ve çevresel kısıtlamalar, özellikle kentsel alanlarda posta ve kargo dağıtımında etkin rota ve bölge planlamasını zorunlu kılmaktadır (Öncan, 2007; Akdoğan vd., 2022).

Bu bağlamda, araç rotalama problemleri (Vehicle Routing Problem – VRP), lojistik ve dağıtım sistemlerinin optimizasyonunda en yaygın çalışılan problem sınıflarından biri olarak öne çıkmaktadır. VRP ilk kez Dantzig ve Ramser (1959) tarafından “kamyon sevkiyat problemi” olarak tanımlanmış olup, o tarihten bu yana çok sayıda uzantısı ve varyantı ile kapsamlı biçimde incelenmiştir. Kapasiteli Araç Rotalama Problemi (Capacitated Vehicle Routing Problem – CVRP), belirli bir kapasiteye sahip araç filosu kullanılarak tek bir depodan coğrafi olarak dağılmış müşteri noktalarına en düşük maliyetli dağıtım rotalarının belirlenmesini amaçlamaktadır. Ancak müşteri sayısının artmasıyla çözüm uzayının üstel biçimde büyümesi, CVRP’nin NP-zor problemler sınıfında yer almasına neden olmakta ve büyük ölçekli uygulamalarda kesin çözüm yöntemlerinin kullanımını sınırlamaktadır (Miao vd., 2024). Türkiye’de gerçekleştirilen uygulamalı çalışmalarda da kapasite kısıtlı araç rotalama problemleri, tamsayı doğrusal programlama temelli kesin çözüm yöntemleri kullanılarak ele alınmış ve özellikle dal-kesme (branch-and-cut) algoritmalarının dağıtım problemlerinde etkin sonuçlar üretebildiği gösterilmiştir (Yıldız ve Tüzemen, 2019).

Bu hesaplama güçlükleri nedeniyle literatürde, büyük ölçekli araç rotalama problemlerini daha yönetilebilir hâle getirmek amacıyla iki aşamalı çözüm yaklaşımları yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlarda problem, önce müşteri noktalarının belirli kriterlere göre kümelere ayrılması, ardından her küme için ayrı bir rotalama alt probleminin çözülmesi şeklinde ele alınmaktadır. Özellikle aynı tip araçlardan oluşan filolar için geliştirilen “önce kümele, sonra rotala” stratejileri, çözüm alanını daraltarak hesaplama süresini önemli ölçüde azaltmaktadır (Lee, 2025).

İki aşamalı yaklaşımların erken ve klasik örneklerinden biri olan süpürme algoritması, Gillett ve Miller (1974) tarafından önerilmiş ve müşteri noktalarının coğrafi açılarına göre sektörlere ayrılması esasına dayanmıştır. Daha sonraki çalışmalarda bu temel yaklaşım, farklı kümeleme ve sezgisel yöntemlerle geliştirilmiştir. León Villalba ve González La Rotta (2022), araç rotalama problemini önce K-means ve yoğunluk tabanlı kümeleme algoritmalarıyla bölgelere ayırmış, ardından sezgisel rotalama teknikleri kullanarak çözmüş ve bu yaklaşımın çözüm kalitesi ile hesaplama süresi açısından etkili olduğunu göstermiştir.

Benzer şekilde, Türkiye’de yapılan çalışmalar da iki aşamalı yaklaşımların dağıtım problemlerinde başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. Akdoğan vd. (2022), yerleştirme ve rotalama kararlarını birlikte ele alan iki aşamalı bir model geliştirerek Covid-19 aşı dağıtımına uygulamış ve kapasite kısıtlarının dikkate alınmasının çözüm kalitesini artırdığını göstermiştir. Altundaş (2024), p-medyan tabanlı tesis yeri seçimi ile araç rotalama problemini bütünleşik bir yapı içinde ele alarak mühimmat dağıtım ağları için etkin çözümler önermiştir. Güncel çalışmalarda ise kapasite kısıtlı yerleşim-rotalama problemleri, ileri çözüm teknikleri ve sezgisel yaklaşımlarla ele alınmakta ve farklı uygulama alanlarında başarıyla uygulanmaktadır (Lee, 2025; Miao vd., 2024).

Bu çalışmada, söz konusu literatürden hareketle posta dağıtım ağları için matematiksel modele dayalı iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı önerilmektedir. İlk aşamada, teslimat noktaları kapasite kısıtlı p-medyan modeli kullanılarak coğrafi bölgelere ayrılmakta ve her bir bölgeye atanacak araçlar dengeli biçimde belirlenmektedir. İkinci aşamada ise her bölge ayrı bir CVRP problemine indirgenmekte ve ilgili bölge için en uygun dağıtım rotaları hesaplanmaktadır. Önerilen yaklaşım, dağıtım iş yükünün araçlar arasında dengeli biçimde dağıtılmasını ve toplam operasyonel maliyetlerin azaltılmasını amaçlamaktadır. Benzer şekilde, farklı sektörlerde yapılan uygulamalı çalışmalarda da kapasite kısıtlarının ve gerçek operasyonel verilerin dikkate alındığı araç rotalama modellerinin, dağıtım maliyetlerini azaltmada ve rota verimliliğini artırmada başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir (Karamahmutoğlu ve Tüzemen, 2025).

Makalenin geri kalanı şu şekilde yapılandırılmıştır: Literatür İncelemesi bölümünde ilgili çalışmalar ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Materyal ve Yöntemler bölümünde kullanılan veri seti, kapasite kısıtlı p-medyan modelinin matematiksel formülasyonu ve çözüm süreci açıklanmaktadır. Sonuçlar ve Tartışma bölümünde

elde edilen bulgular görselleştirmelerle birlikte değerlendirilmektedir. Son olarak, Sonuç ve Öneriler bölümünde çalışmanın genel değerlendirmesi yapılmakta ve gelecekteki araştırmalar için öneriler sunulmaktadır.

2 | LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 Araç Rotalama Probleminin Gelişimi ve Temel Yaklaşımlar

Araç rotalama ve tesis yeri seçimi problemleri, lojistik operasyonlarının verimliliğini artırmak için literatürde uzun yıllardır incelenmektedir. İlk olarak 1959 yılında Dantzig ve Ramser tarafından "kamyon sevkiyat problemi" olarak literatüre kazandırılan Araç Rotalama Problemi (ARP), müşteri sayısı ile çözüm alanı üstel olarak artan NP-zor bir kombinatoriyal optimizasyon problemidir.

ReVelle ve Swain (1970), tesis yeri belirleme literatüründe önemli bir yere sahip olan p-medyan problemini formüle etmiştir. Bu model, toplam mesafeyi en aza indirecek şekilde p merkez seçme ve tüm talepleri bu merkezlere atama problemini ele alır ve hem kamu hizmeti yerleştirme hem de dağıtım problemlerinde yaygın olarak kullanılmıştır.

Büyük ölçekli ARP problemlerini çözmek için iki aşamalı yaklaşımlar erken dönemde geliştirilmiştir. Gillett ve Miller (1974), müşterileri coğrafi konumlarına göre sektörlere ayıran ve her sektör için ayrı bir rota oluşturan Sweep algoritmasını önermiştir. Fisher ve Jaikumar (1981), "önce grupla, sonra rotala" paradigmasının temelini oluşturan iki aşamalı bir algoritma geliştirmiş, ilk aşamayı genelleştirilmiş bir atama modeliyle optimize etmiş ve ardından ikinci aşamada her araç için en kısa rotayı bulmuştur.

Church vd. (2004), p-medyan probleminin bir türevidir olan r-etkisizleştirme medyan problemini ele almıştır. Bir tedarik veya hizmet sisteminde kaybedildiği takdirde en büyük hizmet kesintisine yol açacak kritik tesislerin belirlenmesini amaçlayan bu çalışma, doğal afet veya kasıtlı saldırı senaryolarında altyapının dayanıklılığını değerlendirmek için geliştirilmiş olup, özellikle stratejik altyapı planlaması açısından öncü bir çalışma olarak görülmektedir.

Öncan (2007), kapasite kısıtlı atama problemleri üzerine kapsamlı bir derleme sunmuştur. P-medyan dahil olmak üzere genelleştirilmiş atama problemlerinin planlama, zamanlama, tesis yeri seçimi ve ulaştırma gibi çok çeşitli alanlardaki uygulamalarını sistematik olarak inceleyen bu çalışma, söz konusu problemlerin teorik altyapısı ile pratik uygulamaları arasındaki bağlantıyı ortaya koyarak sonraki entegre modellere zemin hazırlamıştır.

2.2 Posta Hizmetlerinde Araç Rotalama Uygulamaları

Posta ve kargo sektörü, araç rotalama probleminin en yoğun uygulama alanlarından birini oluşturmaktadır. Ji ve Chen (2007), Hong Kong Postası'nın toplama noktaları için araç çizelgesini optimize ederek kaynak kullanımını maksimize etmeyi ve operasyon maliyetlerini minimize etmeyi amaçlamıştır. Tamsayı doğrusal programlama modeli ve CPLEX yazılım paketi kullanılarak geliştirilen çözüm, mevcut manuel planlamaya kıyasla optimal araç rotaları ve çizelgeleri üretebildiğini göstermiştir. Bu çalışma, posta hizmetlerinde bilimsel optimizasyon yöntemlerinin pratik uygulanabilirliğini ortaya koyan öncü çalışmalardan biridir.

Türkiye'de, Bozyer vd. (2014), kapasite kısıtlı araç rotalama problemi için "önce grupla, sonra rotala" prensibine dayalı yenilikçi bir sezgisel algoritma önermiştir. Gruplama adımında talep noktaları bulanık c-ortalama kümeleme yöntemi kullanılarak segmentlere ayrılmış, rotalama adımında ise her grup için rotalar tabu arama algoritması kullanılarak iyileştirilmiştir. Bu çalışma, büyük ölçekli ARP'nin alt parçalara bölünmesi ve her birinin gezgin satıcı problemine dönüştürülmesiyle çözülebileceğini göstermiştir.

Kabiri ve Mesgari (2017), eşzamanlı toplama-dağıtım yapan posta servisi için en optimal taşıma rotalarını bulmayı amaçlamıştır. Arı Kolonisi Algoritması ve Genetik Algoritma gibi meta-sezgiseller kullanılarak Toplama-Dağıtım Problemi modeli çözülmüştür. Testlerde, Arı Kolonisi Algoritmasının (%93) Genetik Algoritmaya (%84) kıyasla en iyi çözüme ulaşmada daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Bu çalışma, posta hizmetlerinin toplama ve dağıtım operasyonlarının entegre şekilde planlanmasının önemini vurgulamıştır.

Şensu vd. (2019), çok sayıda şubesi bulunan bir posta hizmetinde toplam kat edilen mesafeyi azaltarak dağıtım verimliliğini artırmayı hedeflemiştir. Kümeleme yöntemi ile "önce dağıtım, sonra toplama" içeren Geri Toplamalı Araç Rotalama Problemi modeli geliştirilmiştir. Birbirine yakın merkezlerin kümelenecek planlanmasıyla, büyük ölçekli problemlerde çözüm bulunabilirliği sağlanmış ve yöntemin Türkiye'deki posta hizmetlerinde uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Sbai vd. (2020), Tunus Postanesi'nin mektup ve koli toplama/dağıtım sistemindeki toplam taşıma maliyetini minimize etmeyi amaçlamıştır. Genetik Algoritma ile Değişken Komşuluk Arama algoritmasını birleştiren hibrit bir meta-sezgisel geliştirilen çalışmada, önerilen yaklaşımın mevcut yöntemlere kıyasla çözüm kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiği ve literatürdeki en iyi yöntemlerle rekabet edebildiği gösterilmiştir. Bu çalışma, hibrit meta-sezgisel yaklaşımların posta dağıtım problemlerindeki etkinliğini ortaya koymuştur.

Leon ve Gonzalez (2022), Kolombiya'daki bir lojistik operatöründen alınan veriler kullanılarak, k-ortalamlar ve OPTICS tabanlı kümeleme ile zaman pencereli araç rotalama problemini ele almış, ardından en yakın komşu ve 2-opt yöntemleri kullanılarak rota optimizasyonu yapmıştır. Çalışma, hesaplama süresinin makul seviyelere indirilebileceğini ve karmaşık kısıtlamalara sahip ARP problemlerinde bile iyi kalitede çözümler elde edilebileceğini göstermiştir.

2.3 Kapasite Kısıtlı P-Medyan ve Entegre Konum-Rotalama Yaklaşımları

Huang vd. (2022), lojistik merkezi yer seçimi bağlamında çok faktörlü kısıtlamalar içeren bir p-medyan modeli önermiştir. Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması kullanılarak çözülen model, İmmün Genetik Algoritma'ya kıyasla daha iyi sonuçlar vermiş ve bölgesel lojistik sistem verimliliğini artırmak için optimizasyon algoritmalarının yer seçimi problemlerindeki etkinliğini ortaya koymuştur.

Altundaş (2024), askeri lojistik alanında savaş durumu için mühimmat depo ağı tasarımını ele almıştır. İki aşamalı metodolojinin ilk aşamasında p-medyan modeli ile depo açma/kapama kararları ve birim-depo eşleştirmeleri yapılmış, ikinci aşamada ise Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi ile dağıtım rotaları belirlenmiştir. GAMS'te çözülen model, askeri tedarik zincirlerinde yer-rota entegrasyonunun önemini vurgulamıştır.

Baytur vd. (2024), büyük ölçekli çok depolu sistemler için 3 depo ve 502 müşteriden oluşan bir ağda "önce kümele, sonra rota oluştur" yaklaşımını benimsemiştir. Müşterilerin depolar arasında atanması için kapasite kısıtlı p-medyan modeli, her bir depo için rota optimizasyonu içinse araç rotalama problemi kullanılmıştır. Yönlendirilmiş Yerel Arama meta-sezgiseli ile gerçek veriler üzerinde yapılan analizler, bu hiyerarşik metodolojinin ticari dağıtım sistemlerindeki pratik uygulanabilirliğini kanıtlamıştır.

Miao vd. (2024), palet havuz merkezlerinin yer seçimi ve atama problemlerine odaklanmıştır. Toplam maliyeti (taşıma ve kurulum) minimize eden doğrusal bir matematiksel programlama modeli sunan çalışma, kapasite kısıtlı yer-atama problemlerinin döngüsel ekonomi ve paylaşım sistemlerindeki rolünü vurgulamıştır. Duyarlılık analizleri, optimal tesis sayısının belirlenmesine yönelik içgörüler sağlamıştır.

Yüksel vd. (2024), afet yönetimi alanında insani yardım lojistiğinde müdahale süresini minimize etmeyi amaçlayan bir model geliştirmiştir. İnsansız hava araçlarını sürece dahil eden çalışma, "önce kümele, sonra rota oluştur" stratejisiyle çok depolu araç rotalama problemi kurmuştur. Modelin GAMS/CPLEX ile çözümü, afet sonrası lojistik planlamada entegre yaklaşımların ve yeni teknolojilerin potansiyelini ortaya koymuştur.

Lee (2025), en yeni çalışmalardan biri olarak, insanlı-insansız takım çalışması gerektiren askeri keşif senaryolarına odaklanmıştır. Kapasite kısıtlı bir yer-rota problemi olarak formüle edilen modelde, insanlı gemilerin yerleşimi ve insansız yüzey araçlarının rotaları optimize edilmiştir. Lagranj gevşetmesi ve yer temelli bir sezgisel kullanan çalışma, klasik optimizasyon araçlarının modern hibrit askeri sistemlerin lojistiğine nasıl uyarlandığını göstermiştir.

2.4 Literatür Değerlendirmesi ve Çalışmanın Konumlandırılması

Literatür incelendiğinde, posta hizmetlerinde araç rotalama problemlerinin çözümünde üç temel eğilim öne çıkmaktadır. Birincisi, erken çalışmalar temel ARP modelleriyle operasyonel maliyetleri düşürmeye odaklanırken, zamanla çalışmalar daha karmaşık problemlere (eşzamanlı toplama-dağıtım, geri toplama, zaman pencereleri) yönelmiştir. İkincisi, problemlerin NP-zor doğası nedeniyle, kesin çözüm yöntemlerinden

sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalarla doğru belirgin bir geçiş olmuştur. Son dönem çalışmalar, bu algoritmaların hibrit kombinasyonlarını kullanarak çözüm kalitesini daha da artırmayı hedeflemektedir. Üçüncüsü, büyük ölçekli posta ağlarında “önce kümele, sonra rota” stratejisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, problemi önce yönetilebilir kümeler halinde parçalayarak, sonra her bir küme için rotalama yapmayı mümkün kılar.

Kapasite kısıtlı p-medyan ve araç rotalama yaklaşımlarının entegre edildiği çalışmalar ise, askeri lojistikten afet müdahalesine, ticari dağıtımdan döngüsel ekonomiye kadar geniş bir yelpazede kaynak dağılımını ve uygulanabilir ağ tasarımını optimize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmalar, genellikle iki aşamalı (hiyerarşik) veya tam entegre modellerle maliyet, zaman veya hizmet düzeyi gibi çeşitli amaç fonksiyonlarını iyileştirmeyi hedeflemektedir.

3 | MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Veri Seti ve Dağıtım Planlaması

Gizlilik ve erişim kısıtları nedeniyle gerçek operasyonel verilerin paylaşılması mümkün olmadığından, bu çalışmada analizler sentetik bir veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan veri seti; teslimat noktası sayısı, coğrafi dağılım, gönderi hacimleri ve araç kapasitesi kısıtları bakımından gerçek posta dağıtım sistemlerini temsil edecek şekilde tasarlanmıştır.

Toplam 1220 teslimat noktası, her biri için enlem-boydam koordinatları ve teslimat türü bilgileriyle birlikte modele dâhil edilmiştir. Teslimat türleri iki ana sınıfta ele alınmıştır:

- (i) mektuplar (belge ve fatura gibi düşük hacimli gönderiler) ve
- (ii) kargolar (paket ve koliler gibi hacimli gönderiler).

Mektup teslimatlarının hacmi ihmal edilebilir düzeyde kabul edilerek 0 m^3 olarak tanımlanmıştır. Kargo teslimatları için ise her teslimat noktasına ait hacim bilgisi (m^3 cinsinden) veri setinde yer almaktadır. İncelenen dağıtım bölgesinde kargo hacimleri yaklaşık olarak $0,05 \text{ m}^3$ ile $0,5 \text{ m}^3$ arasında değişmektedir. Tüm teslimat noktalarına, her gün tek bir merkezi dağıtım deposundan hizmet verildiği varsayılmıştır.

Dağıtım faaliyetlerinin 8 araç kullanılarak gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Her bir aracın kapasitesi 8 m^3 olarak belirlenmiştir; bu değer, standart bir posta dağıtım aracının taşıyabileceği maksimum hacmi temsil etmektedir. Böylece toplam günlük dağıtım kapasitesi 64 m^3 olmaktadır. İncelenen gün için toplam dağıtım hacminin yaklaşık 45 m^3 olduğu dikkate alındığında, araç kapasite kısıtlarının bağlayıcı olduğu bir planlama problemi elde edilmektedir. Araç sayısının 8 olarak sabitlenmesi ve her bir aracın kapasitesinin eşit kabul edilmesi, problemin kapasite kısıtlı p-medyan modeli ($p = 8$) çerçevesinde ele alınmasını mümkün kılmıştır. Bu yaklaşım, 1220 teslimat noktasının 8 bölgeye ayrılmasını ve her bir bölgenin toplam hacminin araç kapasitesini aşmamasını sağlayacak biçimde modellenmesine olanak tanımaktadır.

✦ Mesafe Matrisi

Dağıtım planlamasında kullanılmak üzere, tüm teslimat noktaları arasındaki mesafeler önceden hesaplanmıştır. Teslimat noktalarının coğrafi koordinatları kullanılarak, noktalar arasındaki gerçek yol mesafelerini temsil eden bir mesafe matrisi oluşturulmuştur. Matriste yer alan her bir d_{ij} değeri, i ve j teslimat noktaları arasındaki en kısa sürüş mesafesini metre cinsinden ifade etmektedir.

Mesafe hesaplamalarında doğrusal (kuş uçuşu) mesafeler yerine, gerçek yol ağını dikkate alan harita servislerinden elde edilen sürüş mesafeleri kullanılmıştır. Bu sayede model, dağıtım araçlarının fiilen kullandığı yol koşullarını yansıtan daha gerçekçi bir mesafe yapısı üzerinden çözülmüştür.

3.2 Kapasite Kısıtlı P-Medyan Modeli

Dağıtım noktalarının sınırlı kapasiteli araçlara atanacağı bölgelerin belirlenmesinde kapasite kısıtlı p-medyan modeli kullanılmıştır. Modelin kümeleri, parametreleri, karar değişkenleri ve matematiksel formülasyonu aşağıda sunulmaktadır.

✦ Kümeler ve Parametreler

$N = \{1,2, \dots, 1220\}$, Teslimat noktaları kümesi.

v_i : i teslimat noktasının gönderi hacmi (m^3), $\forall i \in N$

d_{ij} : i ve j teslimat noktaları arasındaki mesafe (metre), $\forall i, j \in N$

Araç kapasitesi: $Q = 8 m^3$

Seçilecek merkez (araç) sayısı: $p = 8$

✦ Karar Değişkenleri

$y_j = \begin{cases} 1, & \text{eğer } j \text{ noktası bölge merkezi olarak seçilirse} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad \forall j \in N$

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } i \text{ noktası } j \text{ merkezine atanırsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad \forall i, j \in N$

✦ Amaç Fonksiyonu

Tüm teslimat noktalarının atandıkları bölge merkezlerine olan toplam mesafenin minimize edilmesi amaçlanmaktadır:

$$\min Z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

✦ Kısıtlar

Her teslimat noktası yalnızca bir bölge merkezine atanmalıdır:

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

Bir teslimat noktası yalnızca seçilmiş bir merkeze atanabilir:

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, j \in N \quad (3)$$

Seçilen toplam merkez sayısı p'ye eşit olmalıdır:

$$\sum_{j \in N} y_j = p \quad (4)$$

Her bir merkez için atanan toplam teslimat hacmi araç kapasitesini aşamaz:

$$\sum_{i \in N} v_i x_{ij} \leq Q y_j \quad \forall j \in N \quad (5)$$

Karar değişkenleri ikili yapıdadır:

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (6)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in N \quad (7)$$

Amaç fonksiyonu (1), tüm teslimat noktalarının atandıkları merkezlere olan toplam mesafeyi en aza indirmeyi hedeflemektedir. Kısıt (2), her teslimat noktasının yalnızca bir tek merkeze atanmasını garanti eder. Kısıt (3), atamaların yalnızca merkez olarak seçilmiş noktalara yapılmasını sağlayarak modelin mantıksal tutarlılığını korur. Kısıt (4), toplam merkez sayısının önceden belirlenen araç sayısına eşit olmasını zorunlu kılar. Kısıt (5), her merkeze atanan teslimat noktalarının toplam hacminin araç kapasitesini aşmasını engelleyerek kapasite kısıtını temsil eder. Kısıtlar (6) ve (7) ise atama ve merkez seçim değişkenlerinin ikili (0-1) yapıda tanımlandığını ifade etmektedir.

Söz konusu modelin çözümünde, açık kaynaklı CBC (Coin-OR Branch and Cut) karma tamsayı programlama çözücüsü kullanılmıştır. CBC, COIN-OR projesi kapsamında geliştirilen ve özellikle büyük ölçekli karma tamsayı

problemlerinde etkin performans sunan bir çözücüdür. Model, Python programlama dili kullanılarak Pyomo kütüphanesi aracılığıyla formüle edilmiş ve optimal çözüm CBC çözücüsü ile elde edilmiştir.

1220 teslimat noktası ve 8 medyan içeren modelin çözümü, modern bir bilgisayarda birkaç dakika içerisinde tamamlanmıştır. CBC çözücüsü, dallanma ve kesme (branch-and-cut) algoritması kullanarak küresel optimal çözümü garanti etmektedir. Model çıktıları, merkez olarak seçilen noktaları gösteren $y_j=1$ değerleri ile her bir teslimat noktasının hangi merkeze atandığını ifade eden x_{ij} değişkenlerinden oluşmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, dağıtım bölgelerinin nihai olarak belirlenmesini temsil etmektedir.

4 | UYGULAMA: BÖLGESEL KÜMELEME ESASLI ARAÇ ROTALAMA YAKLAŞIMI

Modern lojistik yönetiminde, özellikle yoğun kentsel alanlardaki son kilometre (last-mile) teslimat operasyonlarının optimizasyonu, maliyetlerin azaltılması ve hizmet sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu çalışma kapsamında ele alınan problem, yüksek yoğunluklu teslimat noktalarının araç kapasite kısıtları ve coğrafi yakınlıklar dikkate alınarak operasyonel açıdan yönetilebilir alt bölgelere ayrılması ve her bir bölge için en uygun dağıtım rotalarının belirlenmesi üzerine kurgulanmıştır.

Bu yaklaşımın temel amacı, büyük ölçekli ve hesaplama açısından zorlayıcı olan (NP-zor) Araç Rotalama Problemlerini (VRP), “önce kümele, sonra rotala” stratejisiyle daha küçük ve etkin biçimde çözülebilir alt problemlere indirgemektir. Çalışmanın kapsamı, 1220 adet gerçek teslimat noktasının kapasite kısıtlı p-medyan modeli kullanılarak sekiz ana bölgeye ayrılmasını ve her bölge için ayrı bir rotalama yapısının oluşturulmasını içermektedir.

Uygulama aşamasında, her bir kümelenmiş bölge için klasik kapasiteli VRP modeli bağımsız bir problem olarak ele alınmıştır. Bu modellemede, p-medyan optimizasyonu sonucunda belirlenen merkez noktalar, ilgili bölgeye hizmet verecek araçlar için başlangıç ve bitiş deposu olarak tanımlanmıştır. Bölge içerisinde yer alan tüm teslimat noktalarının, bu merkezden hareket eden tek bir kapalı rota üzerinde ve her noktanın yalnızca bir kez ziyaret edilmesi koşuluyla kapsanması hedeflenmiştir.

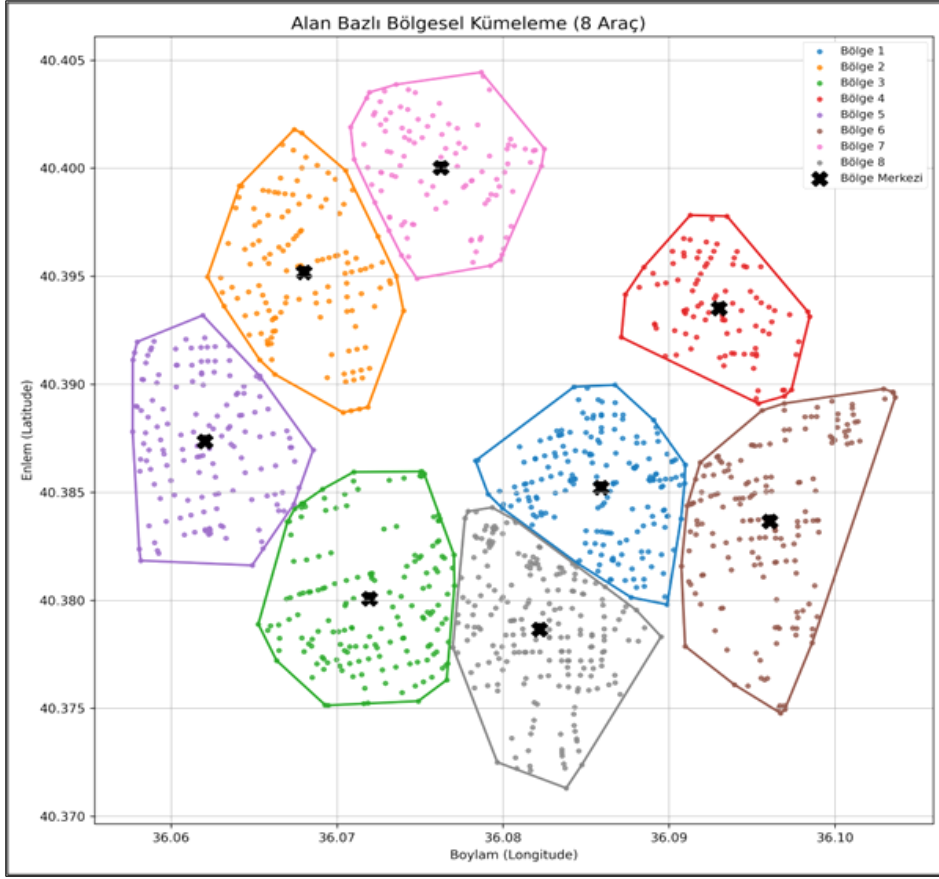
Her bölge için atanan toplam gönderi hacminin araç kapasite sınırını aşmayacak şekilde önceden dengelenmiş olması, her bir bölgeye tek bir araçla hizmet verilmesini mümkün kılmıştır. Bu durum, çok araçlı ve karmaşık bir rotalama probleminin, bölge özelinde optimize edilmiş bir Gezgin Satıcı Problemi (TSP) formuna indirgenmesini sağlayarak çözümün uygulanabilirliğini ve tutarlılığını artırmıştır.

Bölgesel rotaların optimizasyonunda, Google tarafından geliştirilen ve kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümünde yüksek performans gösteren açık kaynaklı OR-Tools kütüphanesi kullanılmıştır. Her bölgeye ait teslimat noktaları ve p-medyan merkezleri, ilgili mesafe matrisleri ile birlikte OR-Tools ortamına aktarılmış ve toplam kat edilen mesafenin minimize edilmesi amaçlanmıştır. OR-Tools, CP-SAT çözücüsü aracılığıyla karma tamsayı programlama yaklaşımlarını ve gerekli durumlarda meta-sezgisel yöntemleri bir arada kullanarak optimum veya optimuma çok yakın çözümler üretmektedir.

Analiz süreci sonunda elde edilen sonuçlar; ziyaret sıralaması, toplam rota uzunluğu ve bölgesel iş yükü dağılımı açısından değerlendirilmiş, elde edilen rotalar coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak görselleştirilmiş ve önerilen yaklaşımın operasyonel verimliliği somut biçimde ortaya konulmuştur.

4.1 Bulgular ve Tartışma

CBC çözücüsü ile çözülen kapasite kısıtlanmalı p-medyan modeli; bölgedeki 1220 teslimat noktasının her küme, o kümeyle hizmet verecek araçlara atanan noktaları içerir 8 optimal kümeyle ayrılmasıyla sonuçlandı. Şekil 1, ortaya çıkan kümelerin harita üzerindeki görselleştirmesini göstermektedir. Farklı renklerdeki noktalar, farklı bölgelere atanan teslimat adreslerini temsil eder. Her bölgenin sınırları yaklaşık olarak çizilmiş ve noktaların konumlarına göre görsel olarak ayrılmıştır. Haritadaki siyah 'X' işaretleri, her bölgenin merkez noktasını gösterir. Bu merkezler, p-medyan modeli tarafından seçilen ve ilgili bölgedeki noktalara atanan medyan noktalarıdır. Başka bir deyişle, 'X' ile işaretlenmiş noktalar, 8 araç için önerilen durma noktaları veya başlangıç konumları olarak düşünülebilir.



Şekil 1: Kapasite Kısıtlı P-Medyan Modeli Kullanılarak 8 Bölgeye Bölünerek Elde Edilen Kümeleme Sonucu

Not: Farklı renkler, farklı bölgelere atanan teslimat noktalarını göstermektedir. Siyah 'X' işaretleri, p-medyan kullanılarak seçilen her bölgenin merkez noktalarını temsil etmektedir. Görüldüğü gibi, bölgeler coğrafi yakınlık dikkate alınarak oluşturulmuş olup, her bölgenin tek bir aracın hizmet verebileceği belirli sayıda teslimatı vardır.

P-medyan modeli çözümüne göre belirlenen 8 merkez nokta, ilgili bölgelerin coğrafi olarak merkezi konumlarında veya teslimat yoğunluğunun yüksek olduğu alanlarda yer almaktadır. Bu durum, bölge içi toplam mesafelerin mümkün olduğunca azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Modelde kapasite kısıtının da dikkate alınması sayesinde, elde edilen bölgelerin toplam teslimat hacimleri araç kapasitelerini aşmamaktadır. Her bir bölgenin toplam teslimat hacmi yaklaşık olarak $3,45 \text{ m}^3$ ile $7,90 \text{ m}^3$ arasında değişmektedir. En yüksek toplam hacim yaklaşık $7,90 \text{ m}^3$ ile Bölge 1'e (kırmızı), en düşük hacimler ise yaklaşık $3,45 \text{ m}^3$ ile Bölge 4 ve Bölge 7'ye aittir. Bu bulgular, bazı bölgelerin araç kapasitesini neredeyse tam olarak kullandığını, bazı bölgelerin ise kapasitenin yaklaşık yarısında kaldığını göstermektedir.

Bölgeler arasındaki hacim farklılıkları, teslimat türlerinin bölgesel dağılımından kaynaklanmaktadır. Merkezi kentsel alanlarda, teslimat noktası sayısı fazla olmakla birlikte, gönderilerin büyük bir kısmı düşük hacimli posta türünden oluşmaktadır. Buna karşılık, bazı banliyö ve kırsal bölgelerde teslimat noktası sayısı daha az olmasına rağmen, yüksek hacimli kargo gönderileri toplam hacmi artırmaktadır. Önerilen modelin temel avantajı, bu tür heterojen yapıları dikkate alarak her bölgenin hem mesafe hem de hacim açısından dengeli biçimde oluşturulmasını sağlamasıdır.

Bölgelerdeki teslimat noktası sayıları da doğal olarak farklılık göstermektedir. Kapasite kısıtı hacme dayalı olarak tanımlandığından, bölgeler arasında teslimat noktası sayısının eşit olması beklenmemektedir. Örneğin, Bölge 8'de toplam 210 teslimat noktası bulunurken, Bölge 4'te bu sayı 95'tir. Bölge 8'de teslimatların büyük çoğunluğunun düşük hacimli posta gönderilerinden oluşması, tek bir aracın çok sayıda adresi ziyaret edebilmesine olanak tanımaktadır. Buna karşılık, Bölge 4'te daha az sayıda adres bulunmasına rağmen, bazı yüksek hacimli kargo gönderileri toplam hacmi yaklaşık $3,45 \text{ m}^3$ seviyesine taşımıştır. Bu nedenle p-medyan

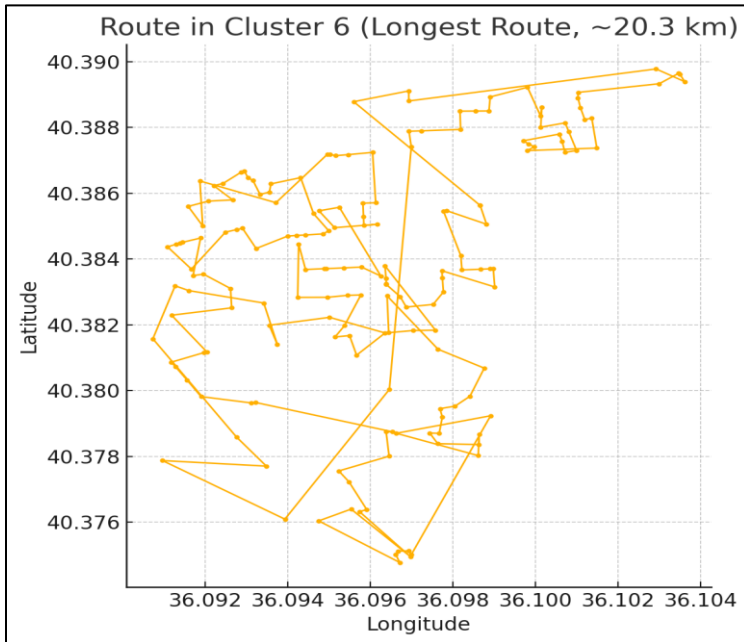
modeli, toplam mesafeyi en aza indirirken ve kapasite kısıtını gözetirken, çok sayıda düşük hacimli teslimat ile az sayıda yüksek hacimli teslimat durumlarını dengeli biçimde ele almaktadır. Sonuç olarak, her bir aracın taşıdığı sevkiyat yükü hacim açısından benzer seviyelerde tutulmuştur.

Her bir bölge için araç rotaları, OR-Tools kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Elde edilen her rota, ilgili bölgenin merkez noktasından başlayıp tüm teslimat noktalarını ziyaret eden ve başlangıç noktasına geri dönen kapalı bir devre şeklindedir. Hesaplanan rota uzunlukları incelendiğinde, bölgeler arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. En kısa rota mesafesi 11,53 km ile Bölge 7 için elde edilirken, en uzun rota 20,29 km ile Bölge 6'ya aittir. Diğer bölgelerin rota uzunlukları genellikle 12 km ile 20 km aralığında yer almaktadır. Araç başına günlük ortalama kat edilen mesafe yaklaşık 15,8 km olarak hesaplanmış olup, bu değer 8 saatlik bir teslimat vardiyası için operasyonel açıdan makul bir düzeydedir.

Rota uzunluklarındaki farklılıkların temel nedeni, bölgelerin coğrafi yayılımıdır. Örneğin, Bölge 7 şehir merkezini kapsayan kompakt bir yapıya sahip olduğundan, teslimat noktaları birbirine yakın konumlanmış ve araç kısa mesafelerde tüm adresleri ziyaret edebilmiştir. Buna karşılık, Bölge 6 daha geniş ve kırsal bir alanı kapsadığından, araç teslimat noktalarına ulaşabilmek için daha uzun mesafeler kat etmek zorunda kalmıştır. Benzer şekilde, yüksek toplam hacme sahip Bölge 1 (7,90 m³, 186 teslimat noktası) kentsel bir alanda yer aldığı için 14,45 km uzunluğunda orta seviyede bir rota uzunluğuna sahiptir. Yüksek hacimli bir diğer bölge olan Bölge 6 (7,06 m³, 175 teslimat noktası) ise coğrafi olarak daha dağınık yapısı nedeniyle 20,29 km ile en uzun rota mesafesine sahiptir. Bu bulgular, dağıtım planlamasında coğrafi yoğunluğun, toplam sevkiyat hacmi kadar belirleyici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 2'de, en uzun rota mesafesine sahip olan Bölge 6'ya ait dağıtım rotası harita üzerinde örnek olarak sunulmaktadır. Bu bölgede araç, merkez noktadan (kırmızı "X" işareti) başlayarak tüm teslimat noktalarını ziyaret etmekte ve yeniden merkeze dönmektedir. Harita üzerinde gösterilen çokgen çizgi, aracın izlediği güzergâhı temsil etmektedir. Söz konusu rota yaklaşık 20,3 km uzunluğunda olup, araç toplam 175 farklı adresi ziyaret etmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere, Bölge 6 geniş bir alanı kapsamakta ve teslimat noktalarına ulaşım çoğunlukla ana yollar üzerinden sağlanmaktadır. Buna rağmen, tüm teslimatlar tek bir tur içerisinde başarıyla tamamlanabilmektedir.

Diğer bölgeler için elde edilen rotalar da benzer şekilde kapalı devreler oluşturmaktadır. Tüm araçlar için hesaplanan rota uzunluklarının toplamı yaklaşık 126,5 km'dir. Bu toplam mesafe, sekiz aracın eş zamanlı olarak çalışması durumunda, tek bir iş günü içerisinde tamamlanabilecek bir operasyonel yükü temsil etmektedir.



Şekil 2: Örnek Bir Araç Rotası (Bölge 6) Haritası

Not: Kırmızı 'X', bölgenin merkez noktasını (araç deposu) gösterir ve güzergahın başlangıç ve bitiş noktasıdır. Mavi çizgi, aracın teslimat noktaları arasında izlediği yolu temsil eder. Bölge 6, kırsal ve kentsel alanların karışımını içerdiğinden, güzergâh nispeten uzun ve dolambaçlıdır. Bununla birlikte, araç tüm noktaları tek bir güzergâh olarak ziyaret ederek dağıtımını başarıyla tamamlamaktadır.

Genel olarak, sonuçlar, kapasite kısıtlanmalı p-medyan modeliyle gerçekleştirilen bölgesel kümelemenin araçların iş yükünü dengelediğini ve toplam seyahat mesafelerini en aza indirdiğini göstermektedir. Her aracın kendi bölgesinde kalması, güzergâh çakışmalarını önleyerek dağıtım ağındaki verimliliği artırır. Modelin, aynı model içinde kentsel alanlarda yüksek hacimli mektup teslimatlarını ve kırsal alanlarda seyrek kargo teslimatlarını değerlendirme yaklaşımı, posta hizmetinin karma yapısı için uygundur. Model, yüksek mektup hacmine ve kargo hacmine sahip alanları ayrı ayrı kümeleyerek her araca farklı görevler atar. Örneğin, bazı araçlar az miktarda ancak birden fazla noktaya teslimat yaparken, diğerleri daha az noktaya daha büyük paketler gönderdi. Bu farklılıklara rağmen, tüm araçlar kapasite sınırları içinde kaldı ve hiçbirinin diğerlerinden önemli ölçüde daha uzun mesafeler kat etmesi gerekmedi. Bu nedenle hem operasyonel denge hem de adil iş bölümü açısından başarılı bir planlama gerçekleştirilmiştir.

5 | SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, posta dağıtım hizmetlerinde bölgesel kümeleme için kapasite kısıtlanmalı bir p-medyan modeli kullanmakta ve bu kümelerle dayalı araç rotalama çözümleri üretmektedir. Önerilen iki aşamalı yaklaşım, gerçek bir dağıtım veri kümesine uygulanmış ve başarılı sonuçlar vermiştir. Özellikle, her bölgenin hacim kapasitesinin aşılmamasını ve mesafelerin en aza indirilmesini sağlayan 1220 dağıtım noktasının 8 bölgeye optimal şekilde bölünmesi önemli kazanımlar sağlamaktadır. Her bölge için ardışık olarak hesaplanan rotalar, toplam 8 aracın günlük dağıtım görevlerini etkili bir şekilde tamamlayabileceğini göstermektedir. Elde edilen rotalar pratik olarak da uygulanabilir; hiçbir aracın rotası aşırı uzun değildir ve bölgeler mantıksal olarak birbirinden ayrılmıştır.

Çalışmanın bulguları, posta dağıtım kuruluşlarında bölge bazlı planlama yaklaşımının faydalarını vurgulamaktadır. Ek kapasite kısıtlamalarıyla birlikte p-medyan modeli sayesinde, her aracın taşıdığı yük (hacim) eşit olarak dağıtılır ve böylece aşırı yüklü veya boşta kalan araçlar sorunu önlenir. Bu, araç filolarının daha verimli kullanılmasına ve yakıt/zaman tasarrufuna yol açar. Ayrıca, bölge bazlı tahsis, dağıtım personelinin belirli mahallelere odaklanarak deneyim kazanmasını ve hizmet kalitesini iyileştirmesini sağlamaktadır.

Elde edilen sonuçlara dayanarak, bu çalışmanın gelecekte geliştirilebileceği bazı yönler bulunmaktadır. Birincisi, zaman aralıkları ve hizmet süreleri gibi dinamik kısıtlamalar ekleyerek modelimizi gerçekçi senaryolara uyarlamak mümkündür. Örneğin, belirli teslimat noktalarının belirli zaman aralıklarında ziyaret edilmesi gerekiyorsa, bu kısıtlamalar VRP modeline dahil edilebilir. Bu durumda, çözüm Kapasite ve Zaman Aralıklı VRP (CVRPTW) haline gelir ve literatürde bu konuda OR-Tools kütüphanesinin de kullanılabileceği belirtilmiştir. İkincisi, daha büyük bölgeler veya kırsal alanlar için birden fazla depo durumu incelenebilir. Posta hizmetlerinin birden fazla şubesi varsa, her şubenin bölgesini p-medyan modeliyle belirleyip ardından her şubenin araç rotalarını ayrı ayrı planlamak, konum-rota belirleme problemi çerçevesinde değerlendirilebilir. Bu çalışma tek merkezli bir senaryoyu ele almıştır; çok merkezli durumlar gelecekteki araştırmalar için önemli bir konudur.

Bir diğer öneri ise sonuçların farklı kümeleme yaklaşımlarıyla karşılaştırılmasıdır. Örneğin, bu çalışmada kapasite kısıtlanmalı p-medyan modeli en iyi sonuçları verse de, büyük problemler için hesaplama süresi artabilir. Bu gibi durumlarda, k-ortalamlar, bulanık kümeleme veya hiyerarşik kümeleme yöntemleri daha hızlı alt optimizasyonlar sağlayabilir. Gelecekte, p-medyan sonuçlarının bu yöntemlerle karşılaştırılmasıyla çözüm kalitesi ve hızı açısından bir değerlendirme yapılabilir. Ayrıca hem kümeleme hem de rota belirleme aşamalarında meta-sezgisel yöntemlerin (genetik algoritma, tabu arama, karınca kolonisi vb.) kullanımı araştırılabilir. Bu tür yöntemler, özellikle çok büyük veri kümeleriyle kesin çözümler elde etmek zor olduğundan, pratikte faydalı olabilir.

Sonuç olarak, kapasite kısıtlanmalı p-medyan tabanlı bölgesel kümeleme ve araç rota belirleme yaklaşımı, posta lojistiğinde verimliliği artırmak için umut vadeden bir yöntemdir. Bu çalışma, yöntemin gerçek dünya örneğinde uygulanabilirliğini göstermiştir. Akademik literatüre katkı olarak, klasik VRP çözümlerine alternatif

bir bakış açısı sunulmuş ve yerel hizmet alanlarının optimizasyonunun genel performansa etkisi ortaya konmuştur. Uygulayıcılar için, günlük operasyonlarda bölgesel planlamanın ve bu bölgeler içindeki rotaların ayrı ayrı optimize edilmesinin, bütünsel optimizasyon kadar etkili sonuçlar verebileceği gösterilmiştir. Gelecekteki çalışmalar, bu yaklaşımı farklı senaryolarda (farklı şehirler, farklı dağıtım türleri) test etmeyi ve daha karmaşık kısıtlamalar ekleyerek yöntemi daha genel hale getirmeyi amaçlamaktadır.

KAYNAKÇA

Akdoğan, B., Fidan, E. M., & Özbakır, L. (2022). Yerleştirme-rotalama problemi için iki aşamalı bir model: Covid-19 aşılarının dağıtımı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(4), 559-568.

Altundaş, A. (2024). An integrated approach for ammunition depot location selection and ammunition distribution network design based on P-median and vehicle routing problems. Container and Modular Design, 1. <https://doi.org/10.59543/comdem.v1i.10539>

Baytur, B., Özceylan, E., Koç, Ç., & Erdoğan, G. (2024). Solving a large-scale multi-depot vehicle routing problem heuristically. In Optimization Essentials (pp. 669–693). Springer International Publishing.

Bozyer, Z., Alkan, A., & Fırlalı, A. (2014). Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Probleminin Çözümü için Önce Grupla Sonra Rotala Merkezli Sezgisel Algoritma Önerisi. Bilişim Teknolojileri Dergisi, 7(2), 29-37.

Church, R. L., Scaparra, M. P., & Middleton, R. S. (2004). Identifying critical infrastructure: The median and covering facility interdiction problems. Annals of the Association of American Geographers, 94(3), 491–502. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.2004.00410.x>

Feld, S., Roch, C., Gabor, T., Seidel, C., Neukart, F., Galter, I., Mauerer, W., & Linnhoff-Popien, C. (2019). A hybrid solution method for the capacitated vehicle routing problem using quantum annealing. Frontiers in ICT, 6, 13. <https://doi.org/10.3389/fict.2019.00013>

Forrest, J., & Lougee-Heimer, R. (2005). CBC (Coin-OR branch-and-cut) solver user guide. Computational Infrastructure for Operations Research.

Huang, Y., Wang, X., Li, T., & Chen, H. (2022). The location selection of logistics center in city based on particle swarm optimization. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1964001/v1>

Ji, P., & Chen, K. (2007). The vehicle routing problem: The case of the Hong Kong postal service. Transportation Planning and Technology, 30(2-3), 167–182. <https://doi.org/10.1080/03081060701390841>.

Kabiri, K., & Saadi Mesgari, M. (2017). Optimization of pick up and delivery problem of postal service between the centers by capacitated vehicles based on metaheuristic algorithms. Journal of Geomatics Science and Technology, 6(4), 173-184.

Karamahmutoğlu, F., & Tüzemen, A. (2025). Tarımsal gıda sektöründe zaman pencereli araç rotalama problemi: Taşkoprü sarımsağı üzerine matematiksel modelleme örneği. Journal of Academic Opinion, 5(2), 66–81.

Lee, J. (2025). Capacitated location-routing problem for a combined manned-unmanned teaming system using Lagrangian relaxation and location-based heuristic. International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice, 32(5). <https://doi.org/10.23055/ijietap.2025.32.5.10347>

León Villalba, A. F., & González La Rotta, E. C. (2022). Solving the vehicle routing problem with time windows using clustering and heuristic algorithms. International Journal of Industrial Engineering Computations, 13(2), 165–184. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2021.12.002>

Miao, B., Shang, X., & Sun, H. (2024). The optimization of the location-allocation problem of pallet pooling centers. In Proceedings of the Eleventh International Forum on Decision Sciences (pp. 1–12). Springer Nature.

Öncan, T. (2007). A survey of the generalized assignment problem and its applications. INFOR: Information Systems and Operational Research, 45(3), 123–141. <https://doi.org/10.3138/infor.45.3.123>

Perron, L., & Furnon, V. (2025). OR-Tools (Version 9.12) [Computer software]. Google. <https://developers.google.com/optimization/>

Rodney, D., Soper, A., & Walshaw, C. (2008). Multilevel approaches applied to the capacitated clustering problem. In *Proceedings of the International Conference on Computational Science (ICCS)* (pp. 271–277). Springer.

Sbai, I., Krichen, S., & Limam, O. (2022). Two meta-heuristics for solving the capacitated vehicle routing problem: the case of the Tunisian Post Office. *Operational Research*, 22(1), 507–549. <https://doi.org/10.1007/s12351-019-00565-2>

Şensu, Ş. E., Arslan, Z., Ekinci, R. D., & Tuzkaya, G. (2019). A vehicle routing model for postal service operations and an application. *International Journal of Advanced Engineering and Pure Sciences*, 31(4), 267–272. <https://doi.org/10.7240/jeps.453159>

Wikipedia contributors. (2025, February 15). OR-Tools. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 08:21, March 24, 2025, from <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=OR-Tools&oldid=1209039445>

Yıldız, Ç., & Tüzemen, A. (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. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3262231>

Yüksel, Z., Epcim, D. E., & Mete, S. (2024). First cluster second route approach with collaboration unmanned aerial vehicle in post-disaster humanitarian logistic. *Journal of Transportation and Logistics*, 8(2), 97–111. <https://doi.org/10.26650/JTL.2023.1372701>