



BULLETIN OF ECONOMIC THEORY AND ANALYSIS

Journal homepage: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/beta>

Konum ve Rota Planlamasında Esneklik Arayışı: Alternatif Yolları Dikkate Alan Konum Rotalama Problemi

Ergül KISA TOĞRUL  <https://orcid.org/0000-0002-7755-5173>

To cite this article: Toğrul Kısa, E. (2025). Konum ve rota planlamasında esneklik arayışı: alternatif yolları dikkate alan konum rotalama problemi. *Bulletin of Economic Theory and Analysis*, 10(1), 287-315.

Received: 2 Dec 2024

Accepted: 22 Jan 2025

Published online: 28 Feb 2025



This manuscript is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License ([CC BY NC](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)).



©All right reserved



Bulletin of Economic Theory and Analysis

Volume 10, Issue 1, pp. 287-315, 2025

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/beta>

Original Article / Araştırma Makalesi

Received / Alınma: 02.12.2024 Accepted / Kabul: 22.01.2025

Doi: <https://doi.org/10.25229/beta.1594825>

Konum ve Rota Planlamasında Esneklik Arayışı: Alternatif Yolları Dikkate Alan Konum Rotalama Problemi

Ergül Kısa TOĞRUL^a

^a Arş. Gör. Dr., Hitit Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Çorum, TÜRKİYE <https://orcid.org/0000-0002-7755-5173>

Öz

Konum Rotalama Problemi (KRP), lojistik ve tedarik zinciri yönetiminde önemli bir optimizasyon problemidir. Bu problem, dağıtım ve depolama süreçlerini etkileyen bir dizi faktörü birleştirerek, maliyetlerin azaltılması ve operasyonel verimliliğin artırılmasını hedeflemektedir. Çalışmanın amacı, dağıtım ağında meydana gelebilecek herhangi bir aksaklığa karşı operasyonları olabildiğince az etkileyecek ve teslimatları aksatmayacak esnek bir modelleme yaklaşımının önerilmesidir. Bu bağlamda, toplam maliyeti minimize etmek amacıyla depo konumlarını ve araç rotalarını optimize etmeye yönelik, düğümler (depolar ve müşteriler) arasında alternatif yolların hesaba katıldığı, Çoklu Grafikte Konum Rotalama Problemi (ÇG-KRP) ele alınmıştır. Problemin çözümü için Karma Tamsayı Doğrusal Programlama (KTDP) modeli önerilmiştir. Matematiksel modelin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla iki ayrı veri seti türetilmiş ve optimum sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, dağıtım ağında alternatif yolların dikkate alınmasının çözümler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Alternatif yolları dikkate almanın daha fazla çözüm süresi gerektirmesine rağmen optimal çözümler elde edilmesinde modele esneklik kazandırabileceği ve toplam maliyeti azaltabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler

Lojistik,
Maliyet,
Rotalama,
Konum Rotalama
Problemi,
Çoklu Grafik

JEL Kodu

C02, C61, L91

İletişim Ergül Kısa TOĞRUL ✉ ergultogrul@hitit.edu.tr Hitit Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Çorum, TÜRKİYE

Atıf Toğrul E. K. (2025). Konum ve rota planlamasında esneklik arayışı: alternatif yolları dikkate alan konum rotalama problemi. *Bulletin of Economic Theory and Analysis*, 10(1), 287-315.



This manuscript is licensed under Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International License ([CC BY NC](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)).

The Search for Flexibility in Location and Route Planning: Location Routing Problem Considering Alternative Paths

Abstract

Location Routing Problem (LRP) is an important optimization problem in logistics and supply chain management. This problem aims to reduce costs and increase operational efficiency by combining a number of factors affecting distribution and storage processes. The goal of the study is to propose a flexible modeling approach that minimizes the impact of any disruptions in the distribution network, ensuring that operations are affected as little as possible and deliveries are not disrupted. In this context, the Multi Graph Location Routing Problem (MG-LRP) is considered, which takes into account alternative paths between nodes (warehouses and customers) to optimize warehouse locations and vehicle routes in order to minimize the total cost. A Mixed Integer Linear Programming (MILP) model is proposed for the problem. In order to demonstrate the applicability of the mathematical model, two separate data sets were derived and optimum results were obtained. Furthermore, sensitivity analyses are conducted to examine the impact of considering alternative routes on the solutions. It has been concluded that, although considering alternative routes requires more solution time, it can provide flexibility to the model in obtaining optimal solutions and reduce the total cost.

Keywords

Logistics,
Cost,
Routing,
Location Routing
Problem,
Multi Graph

JEL Classification

C02, C61, L91

1. Giriş

Tedarik zincirinin bir parçası olan dağıtım, bir ürünün üreticiden nihai tüketiciye ulaşmasını sağlayan en kritik aşamalardan biridir. Dağıtım, sadece bir ürünün fiziksel olarak taşınması değil, aynı zamanda müşteri memnuniyetini artırmak, maliyetleri azaltmak, rekabet avantajı sağlamak, sürdürülebilirliği desteklemek için stratejik bir unsurdur. Bu bağlamda, işletmeler etkin ve iyi planlanmış bir dağıtım ağına ihtiyaç duymaktadırlar. Konum ve araç rotalama kararları, dağıtımın verimliliğini büyük ölçüde etkileyen ve birçok gerçek yaşam durumunda ortaya çıkan iki problem türüdür (Tadaros & Migdalas, 2022).

Tesis Konum Problemi (TKP) ve Araç Rotalama Problemi (ARP) iki farklı karar seviyesini içermektedir. TKP, kararların genellikle uzun vadeli bir süre için geçerli olduğu stratejik karar düzeyine aitken; ARP kısa bir süre için geçerli olan, haftalık hatta günlük olarak değiştirilen taktiksel veya operasyonel karar düzeyine aittir (Salhi & Nagy, 1999). TKP ve ARP geçmişte öncelikle tesislerin konumunun belirlenmesi ve daha sonra araç rotalarının planlanması yoluyla ayrı ayrı çözülmekteyken (Mara vd., 2021; Lopes vd., 2013), zamanla bu geleneksel yaklaşımların birbiriyle oldukça bağlantılı oldukları fark edilmiş ve ayrı problem türleri olarak ele alınmasının optimal olmayan sonuçlara yol açtığı gözlemlenmiştir (Salhi & Rand, 1989). Mevcut bir dağıtım ağında yer alan tesislerin konumlarında yapılan değişiklik, yeni bir dağıtım planını gerektirebilmektedir. Bu bağlamda, fabrika, depo, çapraz-sevkiyat noktaları vb. tesislerin konumu,

tesisler ile çeşitli talep noktaları arasındaki dağıtım yollarının tasarımını büyük ölçüde etkileyebilmektedir (Tadaros & Migdalas, 2022). Günümüzde bu entegre yaklaşım TKP'yi çözmeyi hedeflerken aynı zamanda bir ARP'yi de çözen KRP olarak bilinmektedir (Nagy & Salhi, 2007; Prodhon & Prins, 2014).

KRP, lojistikteki iki temel planlama kararını birleştiren bir matematiksel optimizasyon problemidir. Problemden aşağıdaki kararlar birbirine bağlı olarak verilmektedir (Drexl & Schneider, 2015; Schneider & Drexl, 2017):

- i. Belirli bir amaç için sonlu veya sonsuz potansiyel tesisler arasından hangileri kullanılmalıdır?
- ii. Hangi araç rotaları oluşturulmalıdır? Diğer bir deyişle, hangi müşteri kümeleri oluşturulmalı ve belirli bir hizmeti gerçekleştirmek üzere her kümedeki müşteriler belirli bir filodaki araç tarafından hangi sırayla ziyaret edilmelidir?

Klasik KRP olarak bilinen Kapasiteli KRP (K-KRP)'de tesisler homojen bir araç filosunu paylaşmaktadırlar. Hangi tesislerin açılması, her müşteriye hangi depodan hizmet verilmesi gerektiği belirlenerek ve tüm müşterilere hizmet verecek güzergahlar tasarlanarak çözüm elde edilmektedir. Ayrıca, çeşitli kısıtların da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu kısıtlar, tesis ve araçların belirli kapasiteleri olduğunu ifade etmektedir. Diğer bir deyişle, bir tesise tahsis edilen müşterilerin toplam talebi, tesisin kapasitesini aşmamalıdır. Benzer şekilde, bir araçla hizmet verilen müşterilerin toplam talebi de aracın kapasitesini geçmemelidir. Her araç en fazla bir rota gerçekleştirmekte, bölünmüş teslimatlara izin verilmemekte, her araç rotasını aynı tesiste başlatmakta ve bitirmektedir. KRP'nin, atık yönetimi, afet yardımı, bozulabilir ürün tedarik zinciri, envanter, tersine lojistik, posta hizmetleri vb. alanlarda uygulamaları bulunmaktadır (Tadaros & Migdalas, 2022).

Literatürdeki rotalama problemlerinde dağıtım ağları genellikle ardışık iki düğüm arasında tek bir yayın bulunduğu basit bir grafik olarak ele alınmaktadır. Grafiğin her yayı, olası bir başlangıç-varış bağlantısı için en kısa yolu (mesafe veya süre cinsinden) temsil etmektedir (Garaix vd., 2010; Setak vd., 2015). Ancak, gerçek yaşam uygulamalarında özellikle kentsel alanlarda, bir noktadan diğer bir noktaya ulaşmanın mümkün olduğu alternatif yollar bulunabilmekte ve kimi yollar trafik kazası, trafik sıkışıklığı, yol çalışması vb. sebeplerden dolayı kapanabilmektedir. Öte yandan, bazı yollar geçiş ücreti gibi ekstra maliyetler içerebilmektedir. Ayrıca, en kısa yol her

zaman en az süreli yol anlamına gelmemektedir. Örneğin, bir noktadan diğer bir noktaya şehir içinden veya çevre yolundan farklı mesafe ve sürelerde erişim sağlanabilmektedir. Erişim çevre yolundan daha uzun mesafeli olmasına rağmen daha kısa sürede sağlanabilmektedir. Böylesi durumlarda yalnızca en kısa yolun dikkate alınması diğer bir deyişle problemin basit bir grafik olarak ele alınması, çözüm uzayının daralmasına, çözüm kalitesinin düşmesine ve dolayısıyla maliyeti abartılmış çözümlere veya uygun bir çözümün olmadığına yönelik hatalı bir sonuca ulaşmaya yol açabilmektedir (Ticha vd., 2017; Ticha vd., 2018). Bu bağlamda, dağıtım ağında esnekliğe ihtiyaç duyulabilmektedir. Esneklik, bu tür beklenmeyen durumlarla başa çıkabilmek için alternatif rotaların kullanılmasına olanak tanımaktadır. Böylece, operasyonlar daha az etkilenmekte, teslimatlar zamanında ve verimli bir şekilde yapılabilmektedir.

Söz konusu sorunu ele almak için çoklu grafik gösterimi adı verilen alternatif bir modelleme yaklaşımını öneren ilk yazarlar Baldacci vd. (2006) ve Garaix vd. (2010)'dur (Ticha vd., 2019b). Bu çalışmaların ardından alternatif yolların dikkate alınmasının etkileri kimi yazarlar tarafından araştırılmış ve bu sayede önemli tasarruflar sağlanabildiği sonucuna ulaşılmıştır. Lai vd. (2016)'nın çalışmasında, özellikle ürünlerin müşterilere kısıtlı bir süre içinde teslim edilmesi gerektiğinde, alternatif rota yapısının kullanılmasıyla ulaşım maliyetlerinde önemli tasarruflar elde edilebileceği gösterilmiştir. Huang vd. (2017), yol esnekliğinin dikkate alınması ile maliyet ve yakıt tüketimi açısından önemli tasarruflar elde edilebildiğini göstermiştir. Patoghi vd. (2017)'nin çalışmasında çoklu grafik varsayımının daha az emisyon maliyeti, seyahat süresi ve sürücü sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Tikani & Setak (2019), problemin çoklu grafik ağı üzerinde incelenmesi ile amaç fonksiyonunda %4'e kadar bir azalma gözlemlenmiştir. Soriano vd. (2020), Viyana'daki gerçek yaşam örneği üzerinde yaptıkları analiz sonucunda çoklu grafik yöntemi ile önemli seviyede mesafe tasarrufuna ulaşılmıştır.

Literatürde rotalama problemlerinde çoklu grafik ağının dikkate alındığı çalışmalar oldukça sınırlı sayıda ve genellikle ARP üzerinedir. Yapılan detaylı literatür incelemesinde alternatif yolların dikkate alındığı herhangi bir KRP çalışmasına rastlanılmamıştır. KRP, araç rotalarına kıyasla değiştirmesi daha zor uzun vadeli stratejik kararlar içermekte ve planlamada daha çok bilginin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Dağıtım ağında meydana gelebilecek herhangi bir aksaklığa karşı operasyonları olabildiğince az etkileyecek ve teslimatları aksatmayacak bir çözüm önerisine ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu çalışmada, söz konusu soruna çözüm üretebilmek amacıyla esnek bir modelleme yaklaşımıyla alternatif yolların dikkate alındığı ÇG-KRP için KTDP

modeli önerilmiştir. Problemin amacı, depoların kurulum maliyetini, araçların sabit maliyetini ve araçların değişken maliyetini (seyahat maliyetini) içeren toplam maliyeti minimize edecek konum ve rota kararlarının verilmesidir. Modelin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla iki farklı veri seti üretilmiş ve optimal çözümler elde edilmiştir. Ayrıca, alternatif yolların dikkate alınmamasının optimal çözüm değerleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla iki adet senaryo üzerinden duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma beş bölüm içermektedir. Çalışmanın ikinci bölümünde KRP ve çoklu grafikte rotalama problemine yönelik literatür incelemesine yer verilmektedir. Üçüncü bölümde, ÇG-KRP için problem tanımı ve matematiksel modeli gösterilmektedir. Modelin uygulanmasında kullanılan veri seti, sayısal sonuçlar ve duyarlılık analizleri dördüncü bölümde sunulmaktadır. Son bölümde, çalışmanın sonuçlarından bahsedilmektedir.

2. İlgili Literatür İncelemesi

Bu çalışmada, ÇG-KRP olarak adlandırılan problem üzerinde durulmaktadır. Literatürde KRP'yi ele alan birçok çalışma yer alsa da ÇG-KRP üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Söz konusu problem, KRP ile çoklu grafikte rotalama problemlerini içerdiğinden, her iki probleme yönelik literatürdeki çalışmalardan bahsedilmekte, literatürdeki boşluğu doldurmak amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmanın önemi ortaya konmaktadır.

Alternatif yolların dikkate alındığı diğer bir deyişle çoklu grafikteki rotalama çalışmalarının araştırılmasında “Web of Science” ve “Google Akademik” veri tabanları kullanılmıştır. Konu ile ilgili çalışmaların taranmasında “*Çoklu Grafikte Rotalama Problemi (Routing Problem in Multigraph)*”, “*Çoklu Grafikte Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem in Multigraph)*”, “*Çoklu Grafikte Konum Rotalama Problemi (Location Routing Problem in Multigraph)*”, “*Çoklu Grafikte ARP (VRP in Multigraph)*”, “*Çoklu Grafikte KRP (LRP in Multigraph)*”, “*Rotalama Probleminde Patika Seçimi (Path Selection in Routing Problem)*”, “*Araç Rotalama Problemi'nde Patika Seçimi (Path Selection in Vehicle Routing Problem)*”, “*Konum Rotalama Problemi'nde Patika Seçimi (Path Selection in Location Routing Problem)*”, “*ARP'de Patika Seçimi (Path Selection in VRP)*”, “*KRP'de Patika Seçimi (Path Selection in LRP)*”, “*Alternatif Patikalı (Yollu) Rotalama Problemi (Routing Problem with Alternative Paths)*”, “*Alternatif Patikalı (Yollu) Araç Rotalama Problemi (Vehicle Routing Problem with Alternative Paths)*”, “*Alternatif Patikalı (Yollu) Konum Rotalama Problemi (Location Routing Problem with Alternative Paths)*”, “*Alternatif Patikalı (Yollu)*

ARP (VRP with Alternative Paths), Alternatif Patikalı (Yollu) KRP (LRP with Alternative Paths)” anahtar kelimeleri kullanılmıştır. Ayrıca, konu ile ilgili ulaşılan çalışmaların kaynakçaları ve bu çalışmalara atıfta bulunan çalışmalar incelenmiştir. Toplamda 33 çalışmaya erişim sağlanmıştır.

K-KRP, belirli bir dizi önceden tanımlanmış depo konumunda bir veya daha fazla depo açmayı ve açılan her depo için belirli bir müşteri talebini karşılamak amacıyla bir dizi rota tasarlamayı içermektedir. Her depoya yönelik depo açma ile ilgili sabit bir maliyet ve müşterilere teslim edilebilecek miktarı sınırlayan bir kapasite bulunmaktadır. Problemin amacı, depoların açılması için gereken sabit maliyetler ile depo(lar)dan yönlendirilen güzergahların maliyetlerinin toplamını en aza indirmektir (Baldacci vd., 2011).

Geçmişte konum ve rotalama kararları ayrı ayrı alınmakta iken zamanla bu kararların birbiriyle bağlantılı olduğu keşfedilmiş ve her iki kararın birlikte verilmesine olanak sağlayan KRP literatürde yerini almıştır. Watson-Gandy & Dohrn (1973), depo konumlarını belirlerken müşteri ziyaretlerini açıkça dikkate alan muhtemelen ilk yazarlardır. Depoların konumlandırılmasına araç rotalama kararlarının dahil edilmesinin getirdiği potansiyel faydalar ilk kez Salhi & Rand (1989) tarafından ölçülmüştür. Bu yazarlar, konum ve rota problemlerini ayrı ayrı çözmeyi içeren klasik stratejinin sıklıkla optimal olmayan çözümlere yol açtığını göstermişlerdir. O günden günümüze K-KRP ve versiyonları (örneğin; dinamik KRP, stokastik KRP, ayırık teslimatlı KRP, yeşil KRP, açık KRP, topla-dağıt KRP, çok-kademeli KRP, elektrikli KRP) üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu problemlerin çözümleri için çeşitli kesin ve sezgisel/metasezgisel çözüm yöntemleri geliştirilmiştir (Prodhon & Prins, 2014).

Laporte vd. (1986) tarafından K-KRP için tamsayı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Albareda-Sambola vd. (2007), potansiyel müşterilerin bir kümesinin verildiği ancak bir muhtemel karar verildikten sonra yalnızca bir alt kümesinin hizmet gerektireceği stokastik bir KRP'yi ele almışlardır. Problemin çözümü için, ilk aşamasında uygun bir çözümün elde edildiği sonrasında ise bu çözümün geliştirildiği, iki aşamalı sezgisel bir yöntem kullanmışlardır. Belenguer vd. (2011), dal-ve-kesme algoritması ile K-KRP üzerine çalışmışlardır. Çalışmada modeli güçlendirmek için geçerli eşitsizliklerden faydalanmışlardır. Nadizadeh & Nasab (2014)'ün müşteri taleplerinin bulanık varsayıldığı çalışmasında dinamik K-KRP'nin çözümü için karma sezgisel algoritma kullanılmıştır. Test problemleri ile yapılan kıyaslamalar algoritmanın etkinliğini ve gerçek hayat problemlerinde kullanılabileceğini göstermiştir. Gao vd. (2016), KRP'de dinamik

çevre koşullarını dikkate almışlar ve problemin çözümü için K-ortalama kümeleme algoritması ile karınca kolonisi algoritmasını birleştirmişlerdir. Akpunar & Akpınar (2021), K-KRP üzerine yapmış oldukları çalışmalarında, uyarlanabilir büyük komşu arama ve değişken komşu arama algoritmalarından oluşan bir karma metasezgisel yöntem önermişleridir. Araghi vd. (2021), yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonlarını dikkate alan yeşil stokastik açık KRP için karma doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Küçük, orta ve büyük ölçekli problemlerin çözümü için üç metasezgisel algoritmadan faydalanmışlardır. Talep miktarı, açılacak depo sayısı, depo kapasitesi gibi bazı parametrelerin etkisini incelemek amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, araç türünün yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini irdelemişlerdir. Wang vd. (2021), düşük karbonlu politikaların ayrık teslimatlı KRP üzerindeki etkisi irdelemek amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmada iki seviyeli programlama modeli formüle etmişlerdir. Problemin çözümünde karınca kolonisi optimizasyonu ve tabu arama algoritmalarını içeren karma bir algoritmadan faydalanmışlardır. Aghalari vd. (2023), iklim ve müşteri talebindeki değişkenliğin göz önünde bulundurulduğu, elektrikli araç kullanan teslimat hizmetlerinin rota kararlarını kolaylaştırmak amacıyla şarj istasyonlarının optimum konumu için iki-aşamalı stokastik KRP'yi ele almışlardır. Problemin çözümü için ilerleyici korunma algoritması önermişlerdir. Escobar-Vargas & Crainic (2024)'ün çalışmasında iki-aşamalı bir dağıtım ağında zamana bağlı KRP ele alınmıştır. Problem için karma tamsayı programlama modeli formüle edilmiş ve dinamik ayrıklaştırma keşif tabanlı kesin çözüm yöntemi kullanılmıştır. KRP üzerine yapılan detaylı incelemeler Nagy & Salhi (2007), Prodhon & Prins (2014), Drexl & Schneider (2015), Schneider & Drexl (2017) ve Li vd. (2024)'ün çalışmalarında yer almaktadır.

Söz konusu çalışmaların oldukça sınırlı sayıda ve yalnızca araçların rotalama kararlarının verildiği ARP ve türevleri üzerine oldukları görülmektedir. Bu çalışmalar içerisinde hem konum hem de araçların rota kararlarının alındığı KRP yer almamaktadır. Diğer bir deyişle, literatürdeki çalışmalar yalnızca operasyonel veya taktiksel düzeydeki kısa vadeli araç rotaları kararlarını içermekteyken; bu çalışmada depo konum kararlarını da içeren uzun vadeli stratejik düzeydeki kararlar için de planlama yapılmaktadır. Stratejik kararların değiştirilmesi daha zor ve daha maliyetli olduğundan bu tür kararların verilmesi kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, KRP ARP'ye göre daha çok karar içerdiğinden modele esneklik kazandırmak hem optimal çözümlerin elde edilmesinde hem de doğru kararların verilmesinde katkı sağlayabilmektedir. Çoklu grafikte

rotalama problemlerini ele alan çalışmalar, problem türleri, çözüm yöntemleri ve amaç fonksiyonları Tablo 1 ile sunulmaktadır.

Tablo 1

Çoklu Grafikte Rotalama Problemleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

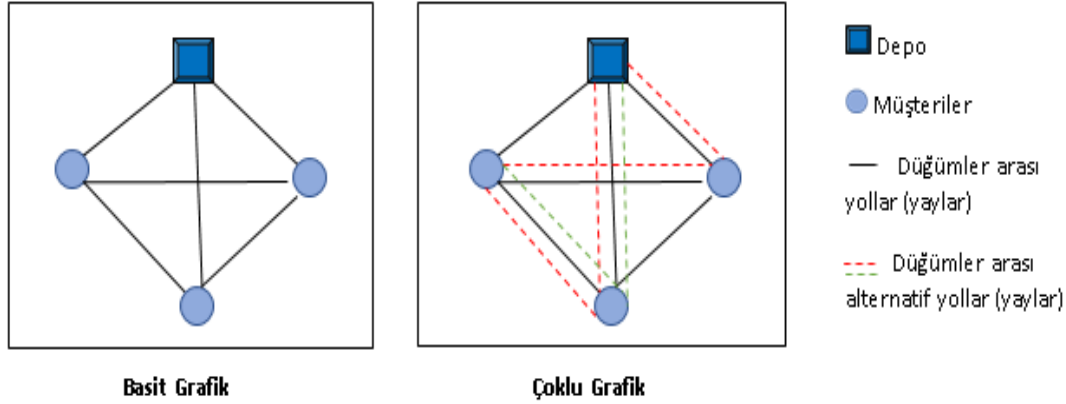
Çalışma	Problem Türü	Çözüm Yöntemi	Amaç Fonksiyonu
Baldacci vd. (2006)	ZP-ARP	SPD-KÇY	Seyahat maliyeti, seyahat süresi
Caramia & Guerriero (2009)	UY-YTP	YAD-SA	Seyahat süresi, seyahat maliyeti
Garaix vd. (2010)	SS-ASP	TSDP, DFA, DP, ES	Seyahat maliyeti, sabit maliyet, seyahat süresi
Wang & Lee (2014)	ZB-ARP	KTP, PSOD-SA	Sabit maliyet, seyahat maliyeti, zaman maliyeti
Setak vd. (2015)	ZB-ARP	KTDP, TAA	Sabit maliyet, zaman maliyeti
Alinaghian & Naderipour (2016)	Y-ZB-ARP	GAA	Yakıt tüketimi
Ehmke vd. (2016)	ZB-ARP	TAA	CO2 emisyonu
Lai vd. (2016)	HARP	KTDP, TAA	Sabit maliyet, seyahat maliyeti
Qian & Eglese (2016)	ZP-ZB-ARP	TAA	CO2 emisyonu
Reinhardt vd. (2016)	ZP-ARP	KTP, DFKA	Seyahat maliyeti
Andelmin & Bartolini (2017)	Y-ARP	KÇA	Mesafe
Androusoopoulos & Zografos (2017)	ZP-ZYPB-ARP	AAVD-SY	Seyahat süresi, yakıt tüketimi
Behnke & Kirschstein (2017)	AS-YS-ARP	KTDP	CO2 emisyonu
Bozkaya vd. (2017)	TD-ZP-KARP	URA	Mesafe, güvenlik riski
Huang vd. (2017)	ZB-ARP	KTP	Yakıt tüketim maliyeti, araç amortisman maliyeti
Liu vd. (2017)	Y-ZP-ARP	KTP	Sürücü maliyeti, yakıt tüketim maliyeti, emisyon maliyeti
Patoghi vd. (2017)	ZB-KRP	KTDP, TAA	Enerji maliyeti, sürücü maliyeti, araç edinim maliyeti, geçiş ücreti
Setak vd. (2017)	ZB-KRP	KTDP, TAA	Enerji maliyeti, sürücü maliyeti, araç edinme maliyeti, geçiş ücreti
Ticha vd. (2017)	ZP-ARP	DFA	Seyahat maliyeti
Ehmke vd. (2018)	ZB-ARP	TAA	Sürücü maliyeti, yakıt maliyeti, yakıt tüketimi, mesafe, süre
Heni vd. (2018)	ZB-ARP	EYKA	Süre, emisyon, maliyet
Andelmin & Bartolini (2019)	Y-ARP	ÇBYAA	Mesafe

Breunig vd. (2019)	E-2A-ARP	KÇA, BKAA	Sabit maliyet, seyahat maliyeti
Ticha vd. (2019a)	ZP-ARP	DFA	Seyahat maliyeti
Ticha vd. (2019b)	ZP-ARP	DP, UBKAA	Seyahat maliyeti
Tikani & Setak (2019)	ZP-ZB-ARP	DP, GA, TAA	Teslimatta gecikmeler
Fröhlich vd. (2020)	PH-ARP	UBKAA	Maliyet, rota tutarsızlığı
Soriano vd. (2020)	FVZ-ARP	KTP, BKAA	Seyahat süresi
Behnke vd. (2021)	Y-ARP	KTDP, SÜA, DFA	CO2 emisyonu
Ticha vd. (2021)	ZP-ZB-ARP	DFA	Mesafe
Tikani vd. (2021)	ZB-ARP	KTDP, DP, GA	Rota tamamlama süresi
Hou vd. (2022)	DARP	GA, DKAA	Seyahat maliyeti
Karimpour vd. (2023)	ZP-EARP	KTDP, US, TAA	Seyahat maliyeti, şarj maliyeti
Bu çalışma	ÇG-KRP	KTDP	Depo kurulum maliyeti, araçların sabit ve değişken maliyetleri

ZP-ARP: Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi, **SPD-KÇY:** Sınırlama Prosedürüne Dayalı Kesin Çözüm Yöntemi, **UY-YTP:** Uzun Yol Yük Taşıma Problemi, **YAD-SA:** Yerel Aramaya Dayalı Sezgisel Algoritma, **SS-ASP:** Sabit Sıralı Ark Seçim Problemi, **TSDP:** Tam Sayılı Doğrusal Programlama, **DFA:** Dal-Fiyat Algoritması, **DP:** Dinamik Programlama, **ES:** Ekleme Sezgiseli, **ZB-ARP:** Zamana Bağlı Araç Rotalama Problemi, **KTP:** Karma Tamsayılı Programlama, **PSOD-SA:** Parçacık Sürü Optimizasyonuna Dayalı Sezgisel Algoritma, **KTDP:** Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama, **TAA:** Tabu Araştırma Algoritması, **Y-ZB-ARP:** Yeşil Zamana Bağlı Araç Rotalama Problemi, **GAA:** Gauss Ateşböceği Algoritması, **HARP:** Heterojen Araç Rotalama Problemi, **ZP-ZB-ARP:** Zaman Pencereli Zamana Bağlı Araç Rotalama Problemi, **DFKA:** Dal-Fiyat-Kesme Algoritması, **Y-ARP:** Yeşil Araç Rotalama Problemi, **KÇA:** Kesin Çözüm Algoritması, **ZP-ZYPB-ARP:** Zaman Pencereli Zamana Yüke ve Patikaya Bağlı Araç Rotalama Problemi, **AAVD-SY:** Ağ Azaltma Yaklaşımına Dayalı Sezgisel Yöntem, **AS-YS-ARP:** Araç Sınıfları ve Yol Seçimi ile Araç Rotalama Problemi, **TD-ZP-KARP:** Toplamalı ve Dağıtmalı Zaman Pencereli Kapasiteli Araç Rotalama Problemi, **URA:** Uyarlanabilir Rastgele Algoritma, **Y-ZP-ARP:** Yeşil Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi, **ZB-KRP:** Zamana Bağlı Kirlilik Rotalama Problemi, **EYKA:** En Yakın Komşu Algoritması, **ÇBYAA:** Çoklu Başlangıç Yerel Arama Algoritması, **E-2A-ARP:** Elektrikli İki Aşamalı Araç Rotalama Problemi, **BKAA:** Büyük Komşu Arama Algoritması, **UBKAA:** Uyarlanabilir Büyük Komşu Arama Algoritması, **GA:** Genetik Algoritma, **PH-ARP:** Periyodik Heterojen Araç Rotalama Problemi, **FVZ-ARP:** Farklı Varış Zamanlı Araç Rotalama Problemi, **SÜA:** Sütun Üretim Algoritması, **KTDP:** Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama, **DARP:** Dinamik Araç Rotalama Problemi, **DKAA:** Değişken Komşu Arama Algoritması, **ZP-EARP:** Zaman Pencereli Elektrikli Araç Rotalama Problemi, **US:** Uyarlanabilir Sezgisel

3. Çoklu Grafikte Konum Rotalama Problemi

Dağıtım ağlarında iki düğüm arasında yalnızca tek bir yolun olduğunun varsayılması diğer bir deyişle problemin basit bir grafik olarak ele alınması hem gerçeklikten uzak hem de hatalı çözümlere neden olabilmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada, iki düğüm arasında birden fazla yolun olduğu çoklu grafikte modelleme yaklaşımı benimsenmektedir. Basit ve çoklu grafik gösterimine yönelik örnek dağıtım ağları Şekil 1 ile sunulmaktadır.



Şekil 1. Basit ve Çoklu Grafik Dağıtım Ağlarının Gösterimi (Yazarın kendi görseli)

3.1. Problem Tanımı

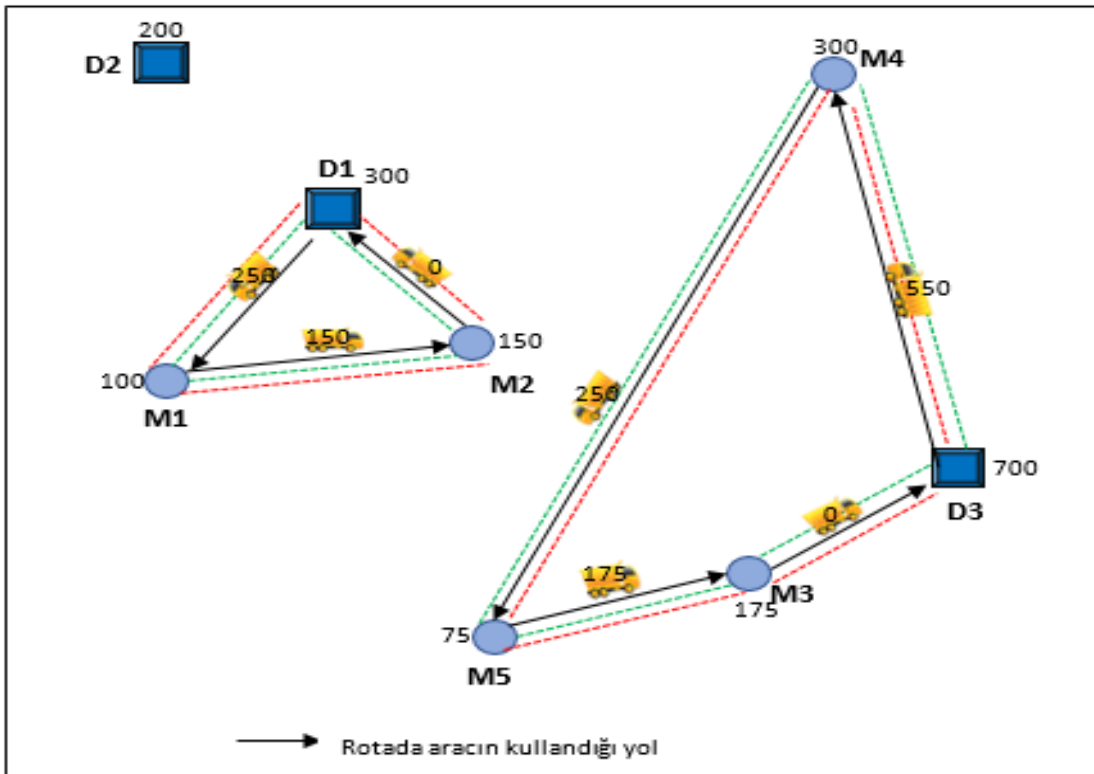
Önerilen ÇG-KRP modeli tam ve yönlendirilmiş bir grafik $G = (V, E)$ üzerinde tanımlanmaktadır. V , potansiyel depo konumlarını gösteren I kümesi ile müşteriler kümesi olan J 'nin bileşiminden oluşmaktadır ($V = I \cup J$). $E = \{(i, j) \mid i, j \in V\}$ düğümleri birbirine bağlayan yaylar kümesidir. İki düğüm arasında birden fazla yolun olduğu varsayılmakta ve yollar kümesi P ile ifade edilmektedir. Her bir araç bir düğümden diğer bir düğüme giderken bu alternatif yollardan yalnızca birini kullanmak durumundadır. Araç filosunda homojen araçlar (yük taşıma kapasitesi, yakıt tüketimi, bakım maliyeti vb. yönden benzer) yer almakta ve K kümesi ile temsil edilmektedir. Q her bir aracın yük taşıma kapasitesidir. F bir aracın kullanılması durumunda katlanması gereken sabit maliyettir. p yolunu kullanarak i 'den j 'ye gitmenin seyahat maliyeti c_{ijp} ile gösterilmektedir ($c_{ijp} \neq c_{jip} > 0$). W_i , i . deponun kapasitesini; O_i ise kurulum maliyetini temsil etmektedir. d_j , j müşterisine ait talep miktarıdır.

Probleme ait varsayımlar şu şekildedir:

- Filodaki tüm araçlar her bir depo tarafından kullanılabilir. Diğer bir deyişle, hiçbir deponun belirli bir filosu yoktur.
- Müşteri talepleri deterministiktir ve önceden bilinmektedir.
- Her bir müşteri talebi yalnızca tek bir araç vasıtasıyla karşılanmaktadır. Ayrık teslimata izin verilmemektedir.
- Araç rotaları bir depoda başlamakta ve aynı depoda sonlanmaktadır.

- Araçlar tek bir tur yapabilmektedir.
- Araç ve depo kapasiteleri aşılmamalıdır.

Probleme yönelik çözüm, en düşük maliyetle, hangi depoların açılması gerektiğinin belirlenmesi, müşterilerin mevcut depolara tahsis edilmesi ve müşterilere ilgili depolardan hizmet verecek araç rotalarının oluşturulmasıdır. ÇG-KRP modelinin örnek dağıtım ağı Şekil 2’de gösterilmektedir. Şekildeki D1, D2, D3 noktaları potansiyel depo yerlerini, M1, M2, ..., M5 müşteri yerlerini göstermektedir. Depo ve müşteri yerleri üzerindeki sayılar, sırasıyla, depo kapasitelerini ve müşteri talep miktarlarını temsil etmektedir. Araç üzerindeki sayılar ise yollarda taşınan ürün miktarlarıdır. Şekilden de görüleceği üzere depoların tümü açılmak durumunda değildir (örneğin, D2 deposu). Müşteri taleplerini karşılamak üzere D1 ve D3 depolarından hizmet verilmektedir. Filodaki araçlardan bir tanesi D1 deposundan rotasına 250 kg’lık yük ile başladıktan sonra sırasıyla M1 ve M2 müşterilerine uğramakta, yine başlangıç noktası olan D1 deposuna geri dönmektedir.



Şekil 2. ÇG-KRP Modeline Ait Örnek Dağıtım Ağının Gösterimi (Yazarın kendi görseli)

Problemde kullanılan notasyonlar özetle Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2

ÇG-KRP Modelinde Yer Alan Küme, Parametre ve Karar Değişkenleri

Grup	Sembol	Anlam
Kümeler	$I = \{1, 2, \dots, i\}$	Potansiyel depolar kümesi
	$J = \{1, 2, \dots, j\}$	Müşteriler kümesi
	$V = I \cup J$	Düğüm kümesi
	$P = \{1, 2, \dots, p\}$	Alternatif yollar kümesi
	$E = \{(i, j): i, j \in V, i \neq j\}$	Yaylar kümesi
	$K = \{1, 2, \dots, k\}$	Araçlar kümesi
Parametreler	c_{ijp}	i ve j düğümü arasındaki p . yolun mesafesi ($\forall i, j \in V, i \neq j, \forall p \in P$) (km)
	Q	Araç kapasitesi (kg)
	F	Araç sabit maliyeti (TL)
	M	Değişken maliyet (TL)
	d_j	j müşterisinin talebi ($\forall j \in J$) (kg)
	O_i	i deposunun kurulum maliyeti ($\forall i \in I$) (TL)
	W_i	i deposunun kapasitesi ($\forall i \in I$) (kg)
Karar Değişkenleri	x_{ijpk}	Araçın i düğümünden j düğümüne p yoluyla k aracı ile gitmesi durumunda 1 diğer durumlarda ise 0 değerini alan ikili karar değişkeni ($\forall i, j \in V, i \neq j, \forall p \in P, \forall k \in K$)
	L_{ijpk}	p yolunu kullanan k aracının i düğümünden ayrılırken yükü ($\forall i, j \in V, i \neq j, \forall p \in P, \forall k \in K$) (kg)
	y_i	i deposunun kurulması halinde 1 diğer durumlarda 0 değerini alan ikili karar değişkeni ($\forall i \in I$)
	z_{ij}	müşteri j 'nin depo i 'ye atanması durumunda 1 diğer durumlarda 0 değerini alan ikili karar değişkeni ($\forall i \in I, j \in J$)

3.2. Matematiksel Model

ÇG-KRP için aşağıda verilen KTDP modeli Prins vd. (2007)'nin KRP modeline dayanmaktadır.

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} O_i y_i + \quad (1.i)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} F x_{ijpk} + \quad (1.ii)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} M c_{ijp} x_{ijpk} \quad (1.iii)$$

Üç parçadan oluşan amaç fonksiyonu toplam maliyeti minimize etmektedir. Toplam maliyet, depoların kurulum maliyetini (1.i), araçların sabit maliyetini (1.ii) ve araçların değişken maliyetini (1.iii) içermektedir.

Kısıtlar:

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} x_{ijpk} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2)$$

(2) ile verilen kısıtlar her bir müşterinin yalnızca tek bir araç tarafından ziyaret edilmesini sağlamaktadır.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} x_{ijpk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{p \in P} x_{ijpk} - \sum_{j \in V} \sum_{p \in P} x_{jipk} = 0 \quad \forall k \in K, \forall i \in V \quad (4)$$

Rotaya başlanılan depoya geri dönülmesini ve akışın korunumunu sağlayan kısıtlar, sırasıyla, (3) ve (4) numaralı kısıtlardır.

$$\sum_{u \in J} \sum_{p \in P} x_{iupk} + \sum_{u \in V \setminus \{j\}} \sum_{p \in P} x_{ujpk} \leq 1 + z_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (5)$$

(5) numaralı kısıtlar bir müşterinin yalnızca onları birbirine bağlayan bir rota açıldığında o depoya atanabileceğini belirtmektedir.

$$\sum_{j \in J} d_j z_{ij} \leq W_i y_i \quad \forall i \in I \quad (6)$$

(6) kısıtları depo kapasitelerinin aşılmamasını sağlamaktadır.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} x_{ijpk} \leq |K| \quad (7)$$

(7) kısıtları kullanılabilir araç sayısını belirtmektedir.

$$\sum_{i \in V \setminus \{j\}} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} L_{jipk} = \sum_{i \in V \setminus \{j\}} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} L_{ijpk} - d_j \quad \forall j \in J \quad (8)$$

Her bir yay üzerindeki yük akışının takibi (8) kısıtlarıyla sağlanmaktadır. Ayrıca, bu kısıtlar vasıtasıyla alt turlar elimine edilmektedir (Bard & Nananukul, 2009).

$$L_{ijpk} \leq Q x_{ijpk} \quad \forall i \in V, \forall j \in V, \forall p \in P, \forall k \in K \quad (9)$$

Araç kapasitelerinin aşılmaması (9) numaralı kısıtlar vasıtasıyla sağlanmaktadır.

$$x_{ijpk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V, \forall j \in V, \forall p \in P, \forall k \in K \quad (10)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (12)$$

$$L_{ijpk} \geq 0 \quad \forall i \in V, \forall j \in V, \forall p \in P, \forall k \in K \quad (13)$$

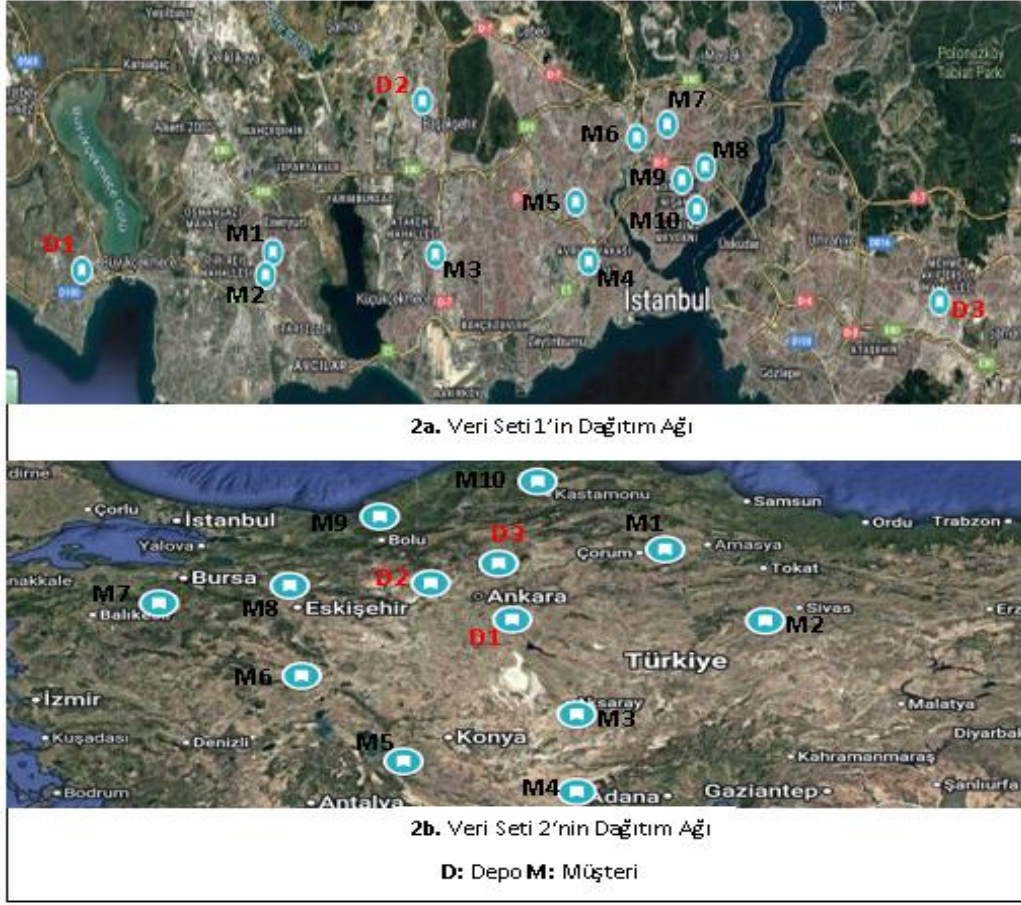
(10)-(13) kısıtları modelde yer alan karar değişkinlerinin tanımına ilişkin kısıtlardır.

4. Sayısal Analizler

Bu bölümde, ÇG-KRP için optimum sonuçları elde etmek üzere geliştirilen matematiksel model analiz edilmiştir. Matematiksel modelin çözümünde, SolverStudio ve Gurobi 11.0.0 programları, Intel (R) i7 işlemci 2.4 GHz hızında 6 GB belleğe sahip bir bilgisayar kullanılmıştır.

4.1. Veri Seti

Modelin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla iki farklı veri seti türetilmiştir. Veri seti 1'de yer alan noktalar Türkiye'de faaliyet gösteren bir kargo şirketinin İstanbul ilindeki şubelerinin yerleri üzerinden türetilmiştir. Veri seti 2'de yer alan noktalar yine aynı şirketin Türkiye genelindeki şubelerinden dağılımlı olacak şekilde örnekleme seçilmiştir. Veri seti 1'de depo ve müşteri yerleri birbirlerine daha yakın mesafelerde iken veri seti 2'de ilgili yerler daha uzak konumda yer almaktadır. Veri setlerine yönelik dağıtım ağının gösterimi Şekil 3 ile sunulmaktadır.



Şekil 3. Veri Setlerine Yönelik Dağıtım Ağlarının Gösterimi (Google Haritalar)

Şekildeki D1, D2, D3 depo yerlerini, M1, M2, M3, ..., M10 ise müşteri yerlerini göstermektedir. Veri setlerine yönelik düğümler arasındaki mesafeler dışındaki tüm parametreler aynıdır ve bu parametreler rastgele seçilmiştir. Her iki veri setinde de 3 adet depo, 10 adet müşteri bulunmaktadır. Dağıtım ağlarında yer alan her iki düğüm arasında üç adet alternatif yolun bulunduğu varsayılmaktadır. Düğümler arasındaki uzaklıklar (mesafe matrisi) Google Haritalar aracılığıyla elde edilmiştir. Veri setlerinde yer alan düğümlere ait koordinat bilgileri Tablo 3 ile verilmektedir. Araç filosunda her biri 3.000 kg taşıma kapasitesine sahip homojen 5 adet araç bulunmaktadır. Araçların sabit (satın alma) maliyeti 2.800.000 TL'dir. Araçların yakıt, sigorta, bakım, sürücü vb. maliyetlerini içeren değişken maliyetleri (TL/km) 1.000 TL'dir. D1'den D3'e, sırasıyla, depoların kurulum maliyetleri 12.000.000, 15.000.000, 20.000.000 TL iken kapasiteleri 5.000, 8.000 ve 10.000 kg'dır. Müşterilere yönelik talep miktarları (0, 3.000] olacak şekilde rastgele seçilmiştir ve M1'den M10'a sırasıyla 2.000, 700, 600, 1.400, 2.200, 800, 1.000, 1.800, 3.000 ve 500 kg'dır.

Tablo 3

Veri Setlerindeki Düğümlere Ait Koordinat Bilgileri

Veri Seti	Düğüm	Koordinat Bilgileri (Enlem, Boylam)
1	D1	41.04161, 28.53910
	D2	41.12028, 28.79727
	D3	41.03235, 29.25380
	M1	41.05359, 28.71548
	M2	41.03909, 28.72372
	M3	41.06912, 28.90637
	M4	41.06083, 29.09863
	M5	41.08775, 28.96679
	M6	41.12500, 29.07391
	M7	41.11052, 29.10137
2	M8	41.10845, 29.15631
	M9	41.10224, 29.10961
	M10	41.09603, 29.12335
	D1	39.38059, 33.18130
	D2	40.09261, 32.15581
	D3	40.26505, 33.07520
	M1	40.38507, 35.16435
	M2	39.37064, 36.34313
	M3	38.15024, 34.08135
	M4	37.06583, 34.09045
M5	37.34014, 31.54088	
M6	38.49460, 30.34316	
M7	39.52096, 28.44041	
M8	40.07545, 30.25488	
M9	41.07006, 31.35167	
M10	41.36093, 33.37596	

4.2. Temel Durum Analizi

Düğümler arasındaki alternatif yolların dikkate alındığı ÇG-KRP matematiksel modeliyle elde edilen optimal sonuçlar Tablo 4’te verilmektedir.

Tablo 4

Veri Setlerine Yönelik ÇG-KRP Optimal Sonuçları

Veri Seti	Toplam Maliyet (TL)	Kurulan Depo(lar)	Araç No	Optimal Rota	Düğümler Arası Taşınan Ürün Miktarı (kg)	Düğümler Arası Kullanılan Yol (Patika)
1	46.399.800	D1, D3	K1	D3-M9-D3	3.000-0	Y2-Y1
			K2	D3-M6-M5-D3	3.000-2.200-0	Y3-Y1-Y1
			K3	D3-M3-M4-M7-D3	3.000-2.400-1.000-0	Y3-Y3-Y2-Y1
			K4	D1-M2-M1-D1	2.700-2.000-0	Y1-Y1-Y1

			K5	D1-M10-M8-D1	2.300-1.800-0	Y1-Y1-Y1
			K1	D1-M8-M10-D1	2.300-500-0	Y2-Y3-Y1
			K2	D3-M5-M6-D3	3.000-800-0	Y1-Y1-Y1
2	51.318.000	D1, D3	K3	D3-M3-M4-M7-D3	3.000-2.400-1.000-0	Y2-Y1-Y1-Y2
			K4	D1-M1-M2-D1	2.700-700-0	Y1-Y2-Y1
			K5	D3-M9-D3	3.000-0	Y2-Y2

Her iki veri setinde de optimal sonuçlara göre üç adet depodan ikisinin (D1 ve D3 depoları) kurulumu yapılmakta ve filoda yer alan araçların tümü ürünlerin müşterilere taşınmasında kullanılmaktadır. Veri seti 1 için toplam maliyet 46.399.800 TL iken veri seti 2 için toplam maliyet 51.318.000 TL'dir. Hem veri seti 1 hem de veri seti 2 için araçların edinim ve depoların kurulum maliyetlerini içeren sabit maliyetleri birbirine eşittir (46.000.000 TL). Ancak, araçların ürün dağıtımından kaynaklı değişken maliyetler veri seti 1 için 399.800 TL, veri seti 2 için ise 5.318.000 TL'dir. Söz konusu farklılığın sebebi veri seti 2'deki düğümlerin daha dağılımlı (birbirlerine daha uzak konumda) yer almaları ve dolayısıyla araçların daha fazla yol katetmeleridir. Amaç fonksiyonu toplam maliyeti minimize etmek olduğundan ve maliyet unsuru noktalar arasındaki mesafe ile orantılı olduğundan tüm araçlar rotalarında üç adet alternatif yoldan en kısa yolu kullanmışlardır. Filodaki her bir araç rotasına bir depodan başlamakta bir veya birden fazla müşteriye ürün teslimi yaptıktan sonra tekrar aynı depoya geri dönmektedir. Örneğin veri seti 1'deki K4 aracı rotasına kurulumu yapılan D1 deposundan 2.700 kg'lık yük ile başlamakta ve buradan M2 müşterisine gitmektedir. M2 müşterisine 700 kg'lık ürün teslimi yaptıktan sonra 2.000 kg'lık ürünü ulaştırmak üzere M1 müşterisine ulaşmaktadır. Araç ürün teslimatlarını yaptıktan sonra rotasına başladığı D1 deposuna tekrar geri dönerek rotasını tamamlamaktadır.

4.3. Duyarlılık Analizleri

Rotalama problemlerinde genellikle iki nokta arasında en kısa yol dikkate alınmakta ve buna göre planlama yapılmaktadır. Ancak, özellikle kentsel alanlarda, bir noktadan diğer bir noktaya ulaşmanın birden fazla yolu bulunabilmekte ve bazı yollar trafik kazası, trafik sıkışıklığı, yol çalışması vb. sebeplerden dolayı kapanabilmektedir. Öte yandan, kimi yollar geçiş ücreti gibi ekstra maliyetler içerebilmektedir. Ayrıca, en kısa yol her zaman en az süreli yol anlamına gelmemektedir. Örneğin, bir noktadan diğer bir noktaya şehir içinden veya çevre yolundan farklı mesafe ve sürelerde erişim sağlanabilmektedir. Erişim çevre yolundan daha uzun mesafeli olmasına rağmen daha kısa sürede sağlanabilmektedir. Böylesi bir durumda yalnızca en kısa yolun dikkate alınması yanlış kararların alınmasına veya optimal çözümün bulunamamasına neden

olabilmektedir. Bu bağlamda, dağıtım ağına esnekliğe ihtiyaç duyulabilmektedir. Esneklik, bu tür beklenmeyen durumlarla başa çıkabilmek için alternatif rotaların kullanılmasına olanak tanımaktadır. Böylece, operasyonlar daha az etkilenmekte, teslimatlar zamanında ve verimli bir şekilde yapılabilmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde, optimal çözümler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, alternatif yolların dikkate alınmadığı iki adet senaryo üzerinden duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Birinci senaryoda literatürdeki çoğu rotalama problemlerinde olduğu gibi dağıtım ağındaki noktalar arasında tek bir yolun bulunduğu en kısa yol hesaba katılmıştır. Bu durumda problem KKRK'ye dönüşmektedir. İkinci senaryoda ise dağıtım ağındaki yollardan bazılarının kapanmış olduğu ve dolayısıyla bu yolların kullanılamayacağı varsayımıyla her iki nokta arasındaki üç alternatif yoldan yalnızca tek bir yol hesaba katılmıştır. Söz konusu yol rastgele olarak seçilmiştir (Patoghi vd., 2017; Tikani & Setak, 2019). Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde senaryo 1 KKRK_min olarak, senaryo 2 KKRK_rastgele olarak anılacaktır. KKRK_min ve KKRK_rastgele matematiksel modelleri ÇG-KRP'deki p indisinin matematiksel modelden kaldırılması yoluyla elde edilmiştir. Optimal sonuçlar Tablo 5'de gösterilmektedir.

Tablo 5

Veri Setlerine Yönelik Duyarlılık Analizleri Optimal Sonuçları

Veri Seti	Problem Türü	Toplam Maliyet (TL)	Kurulan Depo(lar)	Araç No	Optimal Rota	Düğüm Arası Taşınan Ürün Miktarı (kg)	Çözüm Süresi (dk)
1	ÇG-KRP	46.399.800	D1, D3	K1	D3-M9-D3	3.000-0	12,54
				K2	D3-M6-M5-D3	3.000-2.200-0	
				K3	D3-M3-M4-M7-D3	3.000-2.400-1.000-0	
				K4	D1-M2-M1-D1	2.700-2.000-0	
				K5	D1-M10-M8-D1	2.300-1.800-0	
	KKRK_min	46.399.800	D1, D3	K1	D1-M2-M1-D1	2.700-2.000-0	6,33
				K2	D3-M3-M4-M7-D3	3.000-2.400-1.000-0	
				K3	D3-M6-M5-D3	3.000-2.200-0	
				K4	D1-M10-M8-D1	2.300-1.800-0	
				K5	D3-M9-D3	3.000-0	
KKRK_rastgele	46.449.400	D1, D3	K1	D1-M2-M10-M8-D1	3.000-2.300-1.800-0	6,23	
			K2	D3-M9-D3	3.000-0		
			K3	D3-M4-M3-M7-D3	3.000-1.600-1.000-0		
			K4	D1-M1-D1	2.000-0		
			K5	D3-M6-M5-D3	3.000-2.200-0		
2	ÇG-KRP	51.318.000	D1, D3	K1	D1-M8-M10-D1	2.300-500-0	

			K2	D3-M5-M6-D3	3.000-800-0	
			K3	D3-M3-M4-M7-D3	3.000-2.400-1.000-0	312,15
			K4	D1-M1-M2-D1	2.700-700-0	
			K5	D3-M9-D3	3.000-0	
			K1	D1-M1-M2-D1	2.700-700-0	
			K2	D3-M5-M6-D3	3.000-800-0	
KKRP_min	51.318.000	D1, D3	K3	D3-M3-M4-M7-D3	3.000-2.400-1.000-0	2,10
			K4	D3-M9-D3	3.000-0	
			K5	D1-M8-M10-D1	2.300-500-0	
			K1	D3-M9-D3	3.000-0	
			K2	D3-M3-M4-M7-D3	3.000-2.400-1.000-0	
KKRP_rastgele	51.701.000	D1, D3	K3	D1-M2-M1-D1	2.700-2.000-0	24,22
			K4	D1-M10-M8-D1	2.300-1.800-0	
			K5	D3-M6-M5-D3	3.000-2.200-0	

Beklendiği üzere, ÇG-KRP toplam maliyeti minimize etmek amacıyla dağıtım ağındaki üç alternatif yoldan en kısa yolu tercih ettiğinden, her iki veri setine ait ÇG-KRP ve KKRP_min modeli optimal çözümleri (kurulan depolar, araç rotaları ve toplam maliyet) aynı sonuçları üretmektedir. Her ne kadar söz konusu çözümler açısından bir farklılık yokmuş gibi görünse de en kısa yolların kullanılmaması durumunda KKRP_min modelinden çözüm elde edilemezken ÇG-KRP modelinden geriye kalan diğer yolları hesaba kattığından optimal çözüm elde edilebilecektir. Söz konusu durum, depo konum ve araç rotaları planlamasında alternatif yolları dikkate alarak esnekliği sağlamanın önemini ortaya koymaktadır.

ÇG-KRP ve KKRP_rastgele sonuçları karşılaştırıldığında ise iki veri setinde de kurulan depolar ve kullanılan araç sayısı bakımından herhangi bir farklılık olmamasına rağmen ÇG-KRP modelinin toplam maliyet açısından daha iyi sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Veri seti 1 için ÇG-KRP modeline ait toplam maliyet 46.399.800 TL iken KKRP_rastgele modeline ait toplam maliyet 46.449.400 TL'dir. Benzer şekilde, veri seti 2 için ÇG-KRP modeline ait toplam maliyet 51.318.000 TL iken KKRP_rastgele modeline ait toplam maliyet 51.701.000 TL'dir. Bu bağlamda, toplam maliyette veri seti 1 ve 2 için sırasıyla 49.600 TL ve 383.000 TL artış gözlemlenmiştir.

Matematiksel modellerin çözüm süreleri incelendiğinde, ÇG-KRP modelinde diğer modellere kıyasla daha uzun sürelerde çözüm elde edildiği görülmektedir. Söz konusu durum, ÇG-KRP modelinde dağıtım ağında birden fazla yolun yer almasından dolayı çözüm uzayının genişlemesinden kaynaklanmaktadır. Veri seti 1'de ÇG-KRP modeline ait çözüm süresi diğer iki modelin çözüm sürelerinin yaklaşık olarak 2 katıdır. Düşümler arasındaki mesafelerin daha uzun olduğu Veri seti 2'de ise ÇG-KRP modelinin çözüm süresi diğer modellere kıyasla büyük ölçüde

artış göstermiştir. Bu da modelin parametrelere karşı duyarlı olduğunu göstermektedir. Özetle, her ne kadar çoklu grafik varsayımı çözüm süresinin artmasına sebep olsa da ilgili yaklaşımın konum ve rotalama kararlarında esneklik sağlayabileceği ve daha verimli sonuçlar üretebileceği sonucuna varılabilmektedir.

5. Sonuç

Lojistikte rotalama problemleri, özellikle taşıma süreçlerinin optimize edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Rotalama, taşıma araçlarının belirli bir bölge veya güzergah üzerinde en verimli şekilde nasıl hareket edeceğiyle ilgili bir süreçtir. Bu tür problemler, lojistik ve tedarik zinciri yönetiminde, maliyetleri, zaman yönetimini ve müşteri memnuniyetini etkilemesi açısından önemli bir yere sahiptir.

KRP, lojistikte kullanılan önemli bir optimizasyon problemidir. Bu problem, hem depo (servis noktası) yerleşimlerinin belirlenmesi hem de araç rotalarının optimize edilmesi gereksinimini birleştirmektedir. Diğer bir deyişle, KRP, belirli bir sayıda depo veya hizmet noktası ile çok sayıda müşteriye hizmet veren araçların rotalarını ve depo yerleşimlerini en verimli şekilde planlamayı amaçlamaktadır.

Çoğu rotalama problemleri dağıtım ağındaki düğümler (yerler) arasında yalnızca tek bir yolun bulunduğu varsayımıyla planlama yapmaktadır. Ancak, özellikle kentsel alanlarda bir noktadan diğer bir noktaya ulaşmanın birden fazla yolu bulunabilmektedir. Bazı yollar trafik kazası, trafik sıkışıklığı, yol çalışması vb. sebeplerden dolayı kapanabilmektedir. Öte yandan, kimi yollar geçiş ücreti gibi ekstra maliyetler içerebilmektedir. Ayrıca, en kısa yol her zaman en az süreli yol anlamına gelmemektedir. Böylesi bir durumda yalnızca en kısa yolun dikkate alınması yanlış kararların alınmasına veya optimal çözümün bulunamamasına neden olabilmektedir. Bu bağlamda, dağıtım ağında esnekliğe ihtiyaç duyulabilmektedir. Esneklik, bu tür beklenmeyen durumlarla başa çıkabilmek için alternatif rotaların kullanılmasına olanak tanımaktadır. Böylece, operasyonlar daha az etkilenmekte, teslimatlar zamanında ve verimli bir şekilde yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, konum ve rota planlamasında esnekliği sağlamak amacıyla dağıtım ağındaki düğümler arasında bir değil birden fazla yolun hesaba katıldığı KRP ele alınmıştır. ÇG-KRP olarak adlandırılan problemin çözümü için bir matematiksel model önerisinde bulunulmuştur. KTDP modelinin amacı toplam maliyeti minimize etmektir. Toplam maliyet, depoların kurulum maliyeti ve araçların sabit ve değişken maliyetlerini içermektedir. Modelin uygulanabilirliğini göstermek

amacıyla farklı dağıtım ağlarına sahip ve düğümler arasında alternatif yolların bulunduğu iki ayrı veri seti ile çalışılmış, optimum sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, alternatif yolların dikkate alınmasının optimal çözümler üzerindeki etkisini irdelemek amacıyla iki düğüm arasında yalnızca tek bir yolun bulunduğu iki adet senaryo üzerinden duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Düğümler arasındaki mesafeler Senaryo 1'de en kısa yol; senaryo 2'de ise rastgele olarak seçilmiştir. ÇG-KRP modeli ile senaryo 1 sonuçları karşılaştırıldığında optimum sonuçlar açısından bir farklılık gözlenmemiştir. Diğer bir deyişle, her iki modelde de depo konumları, araç rotaları ve toplam maliyet aynıdır. Söz konusu durum, ÇG-KRP modelinin iki nokta arasındaki alternatif yollardan en kısa olanını seçmesinin doğal bir sonucudur. ÇG-KRP modeli ile senaryo 2 sonuçları karşılaştırıldığında ise ÇG-KRP modelinin daha az maliyetle müşteri taleplerini karşılayabildiği gözlemlenmiştir. İlgili modeller çözüm süreleri açısından kıyaslandığında dağıtım ağında düğümler arasında birden fazla yolun bulunmasının çözüm uzayını genişlettiği ve böylece daha uzun sürelerde çözüm elde edilebildiği görülmüştür.

Sonuç olarak, dağıtım ağında alternatif yolları dikkate almanın herhangi bir aksaklığa karşı konum ve rotalama kararlarında esneklik ve operasyonel verimlilik sağlayabileceği ancak daha uzun çözüm süresi gerektireceği söylenebilmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda zaman pencereleri, rota süresi, heterojen araç filosu gibi çeşitli varsayımlar dikkate alınabilir. Ayrıca, büyük ölçekteki problemlerin çözümü için sezgisel ve/veya metasezgisel yöntemler önerilebilir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Etik komite onayı ve/veya yasal/özel izin gerektirmeyen bu çalışma, araştırma ve yayın etiğine uygundur.

Araştırmacının Katkı Oranı Beyanı

Yazar makalenin tek yazarı olduğu için katkı oranı %100'dür.

Araştırmacının Çıkar Çatışması Beyanı

Bu çalışmada herhangi bir potansiyel çıkar çatışması yoktur.

Kaynakça

- Aghalari, A., Salamah, D., Kabli, M., & Marufuzzaman, M. (2023). A two-stage stochastic location–routing problem for electric vehicles fast charging. *Computers & Operations Research*, 158, 106286. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106286>
- Akpunar, Ö. Ş., & Akpınar, Ş. (2021). A hybrid adaptive large neighbourhood search algorithm for the capacitated location routing problem. *Expert Systems with Applications*, 168, 114304. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114304>
- Albareda-Sambola, M., Fernández, E., & Laporte, G. (2007). Heuristic and lower bound for a stochastic location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 940-955. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.04.051>
- Alinaghian, M., & Naderipour, M. (2016). A novel comprehensive macroscopic model for time-dependent vehicle routing problem with multi-alternative graph to reduce fuel consumption: A case study. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 210-222. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.07.029>
- Andelmin, J., & Bartolini, E. (2017). An exact algorithm for the green vehicle routing problem. *Transportation Science*, 51(4), 1288-1303. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0734>
- Andelmin, J., & Bartolini, E. (2019). A multi-start local search heuristic for the green vehicle routing problem based on a multigraph reformulation. *Computers & Operations Research*, 109, 43-63. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.04.018>
- Androutsopoulos, K. N., & Zografos, K. G. (2017). An integrated modelling approach for the bicriterion vehicle routing and scheduling problem with environmental considerations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 82, 180-209. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.06.013>
- Araghi, M. E. T., Tavakkoli-Moghaddam, R., Jolai, F., & Molana, S. M. H. (2021). A green multi-facilities open location-routing problem with planar facility locations and uncertain customer. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124343. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124343>
- Baldacci, R., Bodin, L., & Mingozzi, A. (2006). The multiple disposal facilities and multiple inventory locations rollon–rolloff vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 33(9), 2667-2702. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.02.023>
- Baldacci, R., Mingozzi, A., & Wolfler Calvo, R. (2011). An exact method for the capacitated location-routing problem. *Operations Research*, 59(5), 1284-1296. <https://doi.org/10.1287/opre.1110.0989>
- Bard, J. F., & Nananukul, N. (2009). Heuristics for a multiperiod inventory routing problem with production decisions. *Computers & Industrial Engineering*, 57(3), 713-723. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.01.020>

-
- Behnke, M., & Kirschstein, T. (2017). The impact of path selection on GHG emissions in city logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 106, 320-336. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.08.011>
- Behnke, M., Kirschstein, T., & Bierwirth, C. (2021). A column generation approach for an emission-oriented vehicle routing problem on a multigraph. *European Journal of Operational Research*, 288(3), 794-809. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.06.035>
- Belenguer, J. M., Benavent, E., Prins, C., Prodhon, C., & Calvo, R. W. (2011). A branch-and-cut method for the capacitated location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 38(6), 931-941. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.09.019>
- Bozkaya, B., Salman, F. S., & Telciler, K. (2017). An adaptive and diversified vehicle routing approach to reducing the security risk of cash-in-transit operations. *Networks*, 69(3), 256-269. <https://doi.org/10.1002/net.21735>
- Breunig, U., Baldacci, R., Hartl, R. F., & Vidal, T. (2019). The electric two-echelon vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 103, 198-210. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.11.005>
- Caramia, M., & Guerriero, F. (2009). A heuristic approach to long-haul freight transportation with multiple objective functions. *Omega*, 37(3), 600-614. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2008.02.001>
- Drexl, M., & Schneider, M. (2015). A survey of variants and extensions of the location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 241(2), 283-308. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.08.030>
- Ehmke, J. F., Campbell, A. M., & Thomas, B. W. (2016). Vehicle routing to minimize time-dependent emissions in urban areas. *European Journal of Operational Research*, 251(2), 478-494. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.11.034>
- Ehmke, J. F., Campbell, A. M., & Thomas, B. W. (2018). Optimizing for total costs in vehicle routing in urban areas. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 116, 242-265. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.06.008>
- Escobar-Vargas, D., & Crainic, T. G. (2024). Multi-attribute two-echelon location routing: Formulation and dynamic discretization discovery approach. *European Journal of Operational Research*, 314(1), 66-78. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.09.031>
- Fröhlich, G. E., Doerner, K. F., & Gansterer, M. (2020). Secure and efficient routing on nodes, edges, and arcs of simple-graphs and of multi-graphs. *Networks*, 76(4), 431-450. <https://doi.org/10.1002/net.21993>
- Gao, S., Wang, Y., Cheng, J., Inazumi, Y., & Tang, Z. (2016). Ant colony optimization with clustering for solving the dynamic location routing problem. *Applied Mathematics and Computation*, 285, 149-173. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2016.03.035>

- Garaix, T., Artigues, C., Feillet, D., & Josselin, D. (2010). Vehicle routing problems with alternative paths: An application to on-demand transportation. *European Journal of Operational Research*, 204(1), 62-75. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.10.002>
- Heni, H., Renaud, J., & Coelho, L. C. (2018). Time-dependent vehicle routing problem with emission and cost minimization considering dynamic paths. *Teknik Rapor. CIRRELT-2018-14*. Erişim: 14.05.2024, <https://www.cirrelt.ca/documentstravail/cirrelt-2018-14.pdf>
- Hou, D. K., Fan, H. M., Lv, Y. C., & Ren, X. X. (2022). Dynamic multicompartment refrigerated vehicle routing problem with multigraph based on real-time traffic information. *Journal of Advanced Transportation*, 2022(1), 5538113. <https://doi.org/10.1155/2022/5538113>
- Huang, Y., Zhao, L., Van Woensel, T., & Gross, J. P. (2017). Time-dependent vehicle routing problem with path flexibility. *Transportation Research Part B: Methodological*, 95, 169-195. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.10.013>
- Karimpour, A., Setak, M., & Hemmati, A. (2023). Estimating energy consumption and charging duration of electric vehicle in multigraph. *Computers & Operations Research*, 155, 106216. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106216>
- Lai, D. S., Demirag, O. C., & Leung, J. M. (2016). A tabu search heuristic for the heterogeneous vehicle routing problem on a multigraph. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 86, 32-52. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.001>
- Laporte, G., Nobert, Y., & Arpin, D. (1986). An exact algorithm for solving a capacitated location-routing problem. *Annals of Operations Research*, 6, 291-310. <https://doi.org/10.1007/BF02023807>
- Li, Y., Lim, M. K., Tseng, M. L., Lin, Y., Shi, Y., Huang, X., & Xiong, W. (2024). A literature review of green location routing problem: a comprehensive analysis of problems, objectives and methodologies. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/13675567.2024.2332362>
- Liu, X., Qi, M., & Cheng, C. (2017). Green vehicle routing problem with path flexibility. 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, ss. 1037-1041. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8290050>
- Lopes, R. B., Ferreira, C., Santos, B. S., & Barreto, S. (2013). A taxonomical analysis, current methods and objectives on location-routing problems. *International Transactions in Operational Research*, 20(6), 795-822. <https://doi.org/10.1111/itor.12032>
- Mara, S. T. W., Kuo, R. J., & Asih, A. M. S. (2021). Location-routing problem: a classification of recent research. *International Transactions in Operational Research*, 28(6), 2941-2983. <https://doi.org/10.1111/itor.12950>

-
- Nadizadeh, A., & Nasab, H. H. (2014). Solving the dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm. *European Journal of Operational Research*, 238(2), 458-470. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.012>
- Nagy, G., & Salhi, S. (2007). Location-routing: Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 649-672. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.04.004>
- Patoghi, A., Shakeri, Z., & Setak, M. (2017). A time dependent pollution routing problem in multi-graph. *International Journal of Engineering*, 30(2), 234-242. <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2017.30.02b.00>
- Prins, C., Prodhon, C., Ruiz, A., Soriano, P., & Wolfler Calvo, R. (2007). Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative Lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. *Transportation Science*, 41(4), 470-483. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0187>
- Prodhon, C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.005>
- Qian, J., & Eglese, R. (2016). Fuel emissions optimization in vehicle routing problems with time-varying speeds. *European Journal of Operational Research*, 248(3), 840-848. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.009>
- Reinhardt, L. B., Jepsen, M. K., & Pisinger, D. (2016). The edge set cost of the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*, 50(2), 694-707. <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0620>
- Salhi, S., & Rand, G. K. (1989). The effect of ignoring routes when locating depots. *European Journal of Operational Research*, 39(2), 150-156. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90188-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90188-4)
- Salhi, S., & Nagy, G. (1999). Consistency and robustness in location-routing. *Studies in Locational Analysis*, (13), 3-19.
- Schneider, M., & Drexl, M. (2017). A survey of the standard location-routing problem. *Annals of Operations Research*, 259, 389-414. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2509-0>
- Setak, M., Habibi, M., Karimi, H., & Abedzadeh, M. (2015). A time-dependent vehicle routing problem in multigraph with FIFO property. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.11.016>
- Setak, M., Shakeri, Z., & Patoghi, A. (2017). A time dependent pollution routing problem in multi-graph. *International Journal of Engineering*, 30(2), 234-242. <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2017.30.02b.10>
- Soriano, A., Vidal, T., Gansterer, M., & Doerner, K. (2020). The vehicle routing problem with arrival time diversification on a multigraph. *European Journal of Operational Research*, 286(2), 564-575. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.03.061>

- Tadaros, M., & Migdalas, A. (2022). Bi-and multi-objective location routing problems: classification and literature review. *Operational Research*, 22(5), 4641-4683. <https://doi.org/10.1007/s12351-022-00734-w>
- Ticha, H. B., Absi, N., Feillet, D., & Quilliot, A. (2017). Empirical analysis for the VRPTW with a multigraph representation for the road network. *Computers & Operations Research*, 88, 103-116. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.06.024>
- Ticha, H.B., Absi, N., Feillet, D., & Quilliot, A. (2018). Vehicle routing problems with road-network information: State of the art. *Networks*, 72(3), 393-406. <https://doi.org/10.1002/net.21808>
- Ticha, H. B., Absi, N., Feillet, D., Quilliot, A., & Woensel, T. V. (2019a). A branch-and-price algorithm for the vehicle routing problem with time windows on a road network. *Networks*, 73(4), 401-417. <https://doi.org/10.1002/net.21852>
- Ticha, H. B., Absi, N., Feillet, D., & Quilliot, A. (2019b). Multigraph modeling and adaptive large neighborhood search for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 104, 113-126. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.11.001>
- Ticha, H. B., Absi, N., Feillet, D., Quilliot, A., & Woensel, T. V. (2021). The time-dependent vehicle routing problem with time windows and road-network information. *Operations Research Forum*, 2(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s43069-020-00049-6>
- Tikani, H., & Setak, M. (2019). Efficient solution algorithms for a time-critical reliable transportation problem in multigraph networks with FIFO property. *Applied Soft Computing*, 74, 504-528. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.10.029>
- Tikani, H., Setak, M., & Demir, E. (2021). A risk-constrained time-dependent cash-in-transit routing problem in multigraph under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 293(2), 703-730. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.020>
- Wang, H., & Lee, Y. (2014). Two-stage particle swarm optimization algorithm for the time dependent alternative vehicle routing problem. *Journal of Applied & Computational Mathematics*, 3(4), 1-9. <https://doi.org/10.4172/2168-9679.1000170>
- Wang, C., Peng, Z., & Xu, X. (2021). A bi-level programming approach to the location-routing problem with cargo splitting under low-carbon policies. *Mathematics*, 9(18), 2325. <https://doi.org/10.3390/math9182325>
- Watson-Gandy, C. D. T., & Dohrn, P. J. (1973). Depot location with van salesmen—a practical approach. *Omega*, 1(3), 321-329. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(73\)90108-4](https://doi.org/10.1016/0305-0483(73)90108-4)

EXTENDED ABSTRACT

Distribution, which is a part of the supply chain, is one of the most critical stages in ensuring that a product reaches the end consumer from the manufacturer. Distribution is not just about physically transporting a product, but also a strategic element to increase customer satisfaction, reduce costs, gain a competitive advantage, and support sustainability. In this context, businesses need an efficient and well-planned distribution network. Location and vehicle routing decisions are two types of problems that significantly affect the efficiency of distribution and arise in many real-life situations (Tadaros & Migdalas, 2022).

The Facility Location Problem (FLP) and Vehicle Routing Problem (VRP) involve two different decision levels. FLP is associated with the strategic decision level, where decisions are typically valid for the long term; while VRP is related to the tactical or operational decision level, which is valid for a short period and changes on a weekly or even daily basis (Salhi & Nagy, 1999). In the past, FLP and VRP were typically solved separately, first determining the locations of facilities and then planning the vehicle routes (Mara et al., 2021; Lopes et al., 2013). However, over time, it became clear that these traditional approaches were highly interconnected, and treating them as separate problem types was observed to lead to suboptimal outcomes (Salhi & Rand, 1989). A change in the location of facilities within an existing distribution network may require a new distribution plan. In this context, the location of facilities such as factories, warehouses, cross-docking points, etc. can significantly affect the design of distribution routes between the facilities and various demand points (Tadaros & Migdalas, 2022). Today, this integrated approach, while aiming to solve the FLP, is also known as the Location Routing Problem (LRP), which simultaneously solves a VRP (Nagy & Salhi, 2007; Prodhon & Prins, 2014).

LRP is an important optimization problem used in logistics. This problem combines the need to determine both warehouse (service point) locations and optimize vehicle routes. In other words, LRP aims to plan the routes of vehicles serving a large number of customers and the locations of warehouses or service points in the most efficient way. In the classical version of LRP, known as the Capacitated LRP (C-LRP), facilities share a homogeneous fleet of vehicles. The solution is obtained by determining which facilities to open, which facility should serve each customer, and designing routes to serve all customers. Additionally, various constraints must be considered. These constraints indicate that facilities and vehicles have specific capacities. In other

words, the total demand of customers assigned to a facility should not exceed the facility's capacity. Similarly, the total demand of customers served by a vehicle should not exceed the vehicle's capacity. Each vehicle performs at most one route, split deliveries are not allowed, each vehicle's route starts and ends at the same facility. LRP has applications in areas such as waste management, disaster relief, perishable product supply chains, inventory, reverse logistics, postal services, and more (Tadaros & Migdalas, 2022).

In routing problems in the literature, distribution networks are typically treated as simple graphs where there is a single edge between two consecutive nodes. Each edge of the graph represents the shortest path (in terms of distance or time) for a possible start-destination connection (Garaix et al., 2010; Setak et al., 2015). However, in real-life applications, particularly in urban areas, alternative routes can be available to travel from one point to another, and some roads may be closed due to reasons such as traffic accidents, congestion, or roadworks. On the other hand, some routes may involve extra costs, such as toll fees. Moreover, the shortest path does not always mean the path with the least time. For example, access from one point to another can be achieved via different distances and times, either through the city or along a bypass route. Although the access via the bypass may be longer in distance, it can be achieved in a shorter time. In such cases, only considering the shortest path, or treating the problem as a simple graph, can lead to a narrowing of the solution space, a decrease in solution quality, and thus, result in exaggerated costs or incorrect conclusions, such as the absence of a suitable solution (Ticha et al., 2017; Ticha et al., 2018). Therefore, flexibility may be required in the distribution network. Flexibility allows for the use of alternative routes to cope with these unexpected situations. This way, operations are less affected, and deliveries can be made on time and efficiently.

The first authors to propose an alternative modeling approach called multi graph representation to address this issue are Baldacci et al. (2006) and Garaix et al. (2010) (Ticha et al., 2019b). In the literature, studies that consider multi graph networks in routing problems are quite limited, and are generally focused on the VRP. A detailed literature review revealed no studies on the LRP that take alternative routes into account. LRP involves long-term strategic decisions, which are more difficult to alter compared to vehicle routes, and requires more information to be considered in the planning. A solution that minimally affects operations and does not disrupt deliveries in the face of any disruptions in the distribution network may be required. In this study, to address this issue, a flexible modeling approach incorporating alternative routes is proposed for

the Multi Graph Location Routing Problem (MG-LRP), in the form of a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model. The objective of the problem is to minimize the total cost, which includes the setup cost of warehouses, fixed costs of vehicles, and variable costs (travel costs), by determining the location and routing decisions. To demonstrate the applicability of the model, two separate datasets with distribution networks and alternative routes between nodes were used, and optimal results were obtained. Furthermore, sensitivity analyses were performed on two scenarios, where only a single path exists between two nodes, to explore the impact of considering alternative routes on the optimal solutions. The distances between nodes were chosen as the shortest path in Scenario 1 and randomly in Scenario 2. When the results of the MG-LRP model were compared with Scenario 1, no difference in optimal results was observed. In other words, in both models, warehouse locations, vehicle routes, and total costs were the same. This result is a natural outcome of the MG-LRP model selecting the shortest route between two points from the alternative routes. However, when the results of the MG-LRP model were compared with Scenario 2, it was observed that the MG-LRP model was able to meet customer demands at a lower cost. When the models were compared in terms of solution times, it was observed that having multiple paths between nodes in the distribution network expanded the solution space, thus leading to longer solution times.

Consequently, it can be stated that considering alternative routes in the distribution network can provide flexibility and operational efficiency in location and routing decisions in the face of any disruptions, but it will require longer solution times.

In future studies, various assumptions such as time windows, route duration, and heterogeneous vehicle fleets can be considered. Additionally, heuristic and/or metaheuristic methods could be proposed for solving large-scale problems.