

## Heterojen Araçlar ile Sürdürülebilir Birebir Toplama ve Dağıtım Problemi Üzerine Bir Analiz

Muhammed Enes TAŞDAN<sup>1</sup>, Cem MENTEN<sup>2</sup>, Mehmet SOYSAL<sup>3</sup>, Mustafa ÇİMEN<sup>4</sup>

### ÖZET

**Amaç:** Bu çalışmanın temel amacı, birebir toplama ve dağıtım problemi için önerilen modelin çeşitli senaryolar altında emisyon salınımı ve yakıt tüketimi gibi önemli faktörleri göz önünde bulundurarak uygulanabilirliğini ve kullanımından elde edilecek faydaları ortaya koyabilmektir.

**Yöntem:** Bu çalışmada, araç rotalama probleminin alt türlerinden biri olan birebir toplama ve dağıtım problemi ele alınmaktadır. Problemin çözümü için bir Karışık Tam Sayılı Programlama modeli önerilmiştir.

**Bulgular:** Analizler kapsamında, kısa mesafe yük taşımacılığı faaliyetlerinde elektrikli motora sahip araçların kullanımının emisyon salınımları ve maliyet bakımından faydaları ortaya konmuştur. Ek olarak, sürdürülebilirlik performansının daha da yukarıya çekilmesi adına, kullanılan elektrikli araçlar için ihtiyaç duyulan elektrik enerjisini güneş panelleri ile üretmeyi hedefleyen potansiyel bir yatırım için maliyet analizi yapılmıştır. Güneş panellerine yapılacak yatırımın düşük (ortalama %6) bir getiri oranına sahip olduğundan ötürü bu yatırımın finansal açıdan uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

**Özgünlük:** Literatürdeki ilgili çalışmalardan farklı olarak, dağıtımda kullanılacak araçların elektrikli ve dizel motorlu olduğu varsayılarak farklı senaryolar altında sürdürülebilirlik göstergeleri üzerine değerlendirmelerde bulunulmuştur. Ayrıca, güneş panellerine yapılacak yatırım sonucu elde edilecek çevresel fayda ile çalışmanın sürdürülebilir lojistik yönetimi literatürüne katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürdürülebilir Lojistik, Kısa Mesafe Yük Taşımacılığı, Birebir Toplama ve Dağıtım Problemi, Heterojen Araçlar, Enerji Tüketimi.

**JEL Kodları:** C61, L91, R41.

## An Analysis on Sustainable One-to-One Pickup and Delivery Problem with Heterogeneous Vehicles

### ABSTRACT

**Purpose:** The main goal of this research is to present the applicability of the proposed model for the one-to-one pickup and delivery problem, as well as the benefits of using it, by taking into account important factors such as emissions and fuel consumption under various scenarios.

**Methodology:** This study proposes a Mixed Integer Programming model for the one-to-one pickup and delivery problem, which is a variant of the vehicle routing problem.

**Findings:** The analyses show that using electric vehicles in short-haul freight transportation activities saves money and reduces emissions. Furthermore, to improve the sustainability performance even further, a cost analysis of a potential investment aimed at producing the electrical energy required for electric vehicles using solar panels is performed. Due to the low rate of return (on average 6 percent) on the investment in solar panels, the conclusion is that the investment in question is not financially appropriate.

**Originality:** In contrast to previous attempts, it is assumed that the vehicles to be used in distribution are electric and diesel vehicles, and sustainability indicators are evaluated under various scenarios. Furthermore, it is anticipated that working with the environmental benefit to be obtained as a result of the solar panel investment will contribute to the literature on sustainable logistics management.

**Keywords:** Sustainable Logistics, Short-Haul Freight Transportation, One-to-One Pickup and Delivery Problem, Heterogeneous Vehicles, Energy Consumption.

**JEL Codes:** C61, L91, R41.

<sup>1</sup> Hacettepe Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Ankara, Türkiye, enestasdan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7414-0757.

<sup>2</sup> Arş. Gör., Hacettepe Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Ankara, Türkiye, cemmenten@hacettepe.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0259-3770 (*Sorumlu Yazar-Corresponding Author*).

<sup>3</sup> Doç. Dr., Hacettepe Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Ankara, Türkiye, mehmetsoysal@hacettepe.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1570-660X.

<sup>4</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Hacettepe Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Ankara, Türkiye, mcimen@hacettepe.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8155-9145.

DOI:

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş Tarihi / Submitted Date: 19.04.2022 | Kabul Tarihi / Accepted Date:

## EXTENDED ABSTRACT

Logistics has become one of the most important sectors for national economies, contributing to economic growth and playing a key role in international competition. Freight transportation and distribution activities are among the vital components of logistics management and planning. Academic literature makes extensive use of green practices aimed at preventing environmental pollution and minimizing environmental damage in the field of freight transportation and logistics, as the impact of logistics activities on the environment and human health has become more sensitive in recent years. This study addresses a pickup and delivery problem, which is a variant of the vehicle routing problem. The problem includes pickup and delivery points, with goods/services being supplied at pickup locations and requested at delivery sites.

This study addresses a one-to-one pickup and delivery problem employing both diesel and electric vehicles. The study is first to address this type of heterogeneity of the vehicle fleet for one-to-one pickup and delivery problems. For this problem, a Mixed Integer Programming (MIP) model is proposed, and the MIP model is utilized to analyze CO<sub>2</sub> emissions and fuel consumption in distribution activities under various scenarios. The objective of this study is to demonstrate the applicability of the proposed model and benefits to be gained from its use by taking important factors such as emission release and fuel consumption into account, as well as to explore various pickup and delivery scenarios involving heterogeneous vehicles powered by diesel and electric engines. In practice, it is anticipated that the use of suggested model has potential to lower distribution costs and emissions. Consequently, it is expected that productivity of logistics operations will improve.

In this study, a MIP model for the one-to-one pickup and delivery problem was suggested and studied. The MIP model is utilized to evaluate emission and fuel consumption indicators generated by transportation-related activities under different scenarios. In the first step of computational analysis, a routing problem with one warehouse, one artificial warehouse, and pickup and delivery points is solved. Then, we do a sensitivity analysis to determine how changing the parameters of the initial problem affects the optimal solution and distribution plan. To achieve this objective, we use the initial problem as the main scenario and alter the vehicle capacities, fuel costs, the maximum distance an electric vehicle can travel, and the locations/orders for pickup and delivery points.

We compare fuel costs and emission levels in various sustainability scenarios, and we develop distribution plans that incorporate the usage of electric motor vehicles for short-distance freight transport. We evaluate emission scores and fuel costs in multiple scenarios involving the use of vehicles with diesel engines, electric engines, and a combination of diesel and electric engines. The fleet with four electric motors is the least expensive and emits the least amount of carbon dioxide. Under the sustainability scenarios, a breakeven analysis is also performed based on the cost of solar panel construction to see if the required electrical energy generation will be less expensive. According to the break-even analysis, this possible investment in solar panels will yield a return in around thirteen years. The estimated average rate of return on this investment is 6%. Within the framework of returns to scale, the scale will increase as more solar panels are constructed to generate more electricity, and the internal rates of return will reach much higher values as this growth leads to a higher proportional increase in returns.

The findings demonstrate that the use of electric cars for short-distance freight transportation yields less expensive and more environmentally friendly results. Moreover, due to the poor rate of return on the investment in solar panels that would give the necessary electricity, it is concluded that this investment is not financially viable. A shortcoming of the study could be that the proposed mathematical model requires large computation time and memory when used to realistically large-scale problems. Developing a heuristic for solving large-scale problems is, accordingly, a sound future research direction. Consideration can also be given to other scenarios in which electric car batteries can be charged and vehicles can travel longer distances.

## 1. GİRİŞ

Lojistik, ekonomik büyümeye katkı sağlaması ve uluslararası rekabette kilit rol oynaması bakımından ülke ekonomileri için en önemli sektörlerinden biri hâline gelmiştir. Lojistik, müşterilerin talep ve ihtiyaçlarını karşılamak adına mal ve hizmetlerin başlangıç noktasından tüketimin gerçekleştirildiği varış noktasına ulaştırılmasıdır (Li, 2014). Lojistik faaliyetlerinin temel amacı genel olarak, doğru ürünün, doğru zamanda, doğru yere ulaştırılmasıdır. Bu doğrultuda verilen kararların, belirlenen performans kriterleri bakımından (minimum maliyet, minimum CO<sub>2</sub> salınımı, maksimum kar, vb.), belirli bir kısıt kümesinin altında (araç kapasitelerinin aşılmaması, müşteri taleplerinin karşılanması, zaman pencerelerinin göz önünde bulundurulması vb.) en iyi düzeye getirilmesi sağlanmaktadır (Ghiani ve diğerleri, 2004). Firmalar, lojistik yönetim süreçlerini etkin bir şekilde planlayabildikleri takdirde, lojistik faaliyetlerinde rekabet avantajı elde edebilmektedir (Chopra ve Meindl, 2013).

Yük taşımacılığı ve nakliye faaliyetleri, lojistik yönetimi ve planlaması operasyonlarının en önemli bileşenlerinden biridir. Tekerleğin icadı ile birlikte başladığı varsayılabilecek yük taşımacılığı, günümüzde kara, hava ve deniz gibi farklı ulaşım araçları ile gerçekleştirilmektedir. Önemi gün geçtikçe artan sürdürülebilirlik konusu yük taşımacılığı ve lojistik alanında dikkat çekmektedir (Franceschetti ve diğerleri, 2013). İşletmelerin, yürüttükleri lojistik operasyonların olumsuz çevresel dışsallıkları düşündüğünde, kendilerini sorumlu hissederek daha çevre ve toplum duyarlı hareket etmeleri zorunluluğu doğmuştur. Lojistik faaliyetlerin gün geçtikçe çevreye ve insan sağlığına daha duyarlı hâle gelmesinin de etkisi akademik literatürde yük taşımacılığı ve lojistik alanında çevresel kirliliğin önüne geçmeyi ve çevreye verilen zararı azaltmayı hedefleyen yeşil uygulamalar oldukça ilgi uyandırıcı hâle gelmiştir (Demir ve Van Woensel, 2013; Zhu ve diğerleri, 2014; Soysal ve diğerleri, 2017). Bu uygulamalara, taşımacılık faaliyetlerinde kullanılan araçların emisyon salınımı değerlerinin azaltılması, dizel yakıtlardaki kükürt oranının düşürülmesi ve alternatif enerji kaynaklarının kullanımının özendirilmesi örnek olarak verilebilir (Rushton ve diğerleri, 2010).

Sürdürülebilir lojistik çerçevesinde, çeşitli ekonomik kaygıların (ör. kar maksimizasyonu, zamanında teslimat vb.) yanı sıra, çevresel (ör. hava kirliliği, sera gazları, gürültü kirliliği, arazi kullanımı, enerji kullanımı/enerji verimliliği, ambalajlama veya taşımacılık faaliyetlerinde atık yönetimi, yenilenebilir enerji kullanımı vb.) ve sosyal (ör. erişilebilirlik, istihdam düzeyi ve koşulları, güvenlik ve sağlıkla ilgili olaylar vb.) çıktılar ile de ilgilenilmektedir. Lojistik faaliyetlerin sürdürülebilirlik performansını değerlendirebilmek adına lojistik yönetimi literatüründe sera gazı emisyonları ve enerji kullanımı temel performans göstergeleri olarak ele alınmaktadır (Soysal ve diğerleri, 2018).

Yük taşımacılığı faaliyetlerinde sera gazı emisyonlarını ve ilgili maliyetleri düşürmek için kullanılan başlıca yaklaşımlardan birisi, elektrikli araçların kullanımınıdır (örn. Jabali ve diğerleri, 2012; Demir ve Van Woensel, 2013; Franceschetti ve diğerleri, 2013; Pelletier ve diğerleri, 2014; Taefi ve diğerleri, 2017; Soysal ve diğerleri, 2018). İhtiyaç duyulan elektriğin yenilenebilir enerji kaynaklarından (rüzgâr, güneş, jeotermal, hidrolik, dalga ve biyokütle) elde edilmesi sürdürülebilirliğe potansiyel olarak ek katkılar sağlayabilir.

İlk olarak Dantzig ve Ramser tarafından 1959'da ortaya atılan Araç Rotalama Problemi (ARP), belirli bir müşteri grubuna hizmet etmek için bir araç filosu tarafından gerçekleştirilecek en uygun rota setinin belirlenmesini gerektiren optimizasyon problemlerinden biridir (Toth ve Vigo, 2002). Ortaya atıldığından bu yana ARP akademik literatürde giderek popüler hale gelmiştir. Klasik ARP, gerçek yaşam problemlerini çözebilmek adına birçok yönden genişletilerek çok farklı türleri ortaya konmuştur (Braekers ve diğerleri, 2016). Bu çalışmanın da konusunu oluşturan Toplama ve Dağıtım Problemi (Pickup and Delivery Problem) aynı zamanda Araç Rotalama Problemi'nin (Vehicle Routing Problem) alt türlerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Savelsbergh ve Sol, 1995). Toplama ve Dağıtım Problemi'nin varyantlarının yabancı ve yerli literatürde birçok çalışmada yer aldığı görülmektedir (Keçeci ve diğerleri, 2015; Yazgan ve Büyükyılmaz, 2017; Naccache ve diğerleri, 2018; Atasagun ve Karaoğlan, 2019; Aydoğdu ve Özyörük, 2020; Belgin ve diğerleri, 2021; Park ve diğerleri, 2021; Sherif ve diğerleri, 2021; Cherkesly ve Gschwind, 2022). Toplama ve dağıtım noktalarından oluşan bu probleme göre, toplama noktaları mal/hizmet arz etmekte iken, dağıtım noktalarında mal/hizmet talep edilmektedir. Bununla birlikte, aktarma noktası barındırmamaktadır. Dağıtım faaliyetlerinde, araçlar seyahatlerine bir merkezi depodan başlamakta ve aynı depoda sonlandırmaktadır. Dağıtım planı çerçevesinde, araçlar her bir toplama (başlangıç) noktasından aldığı yükü ilgili dağıtım (varış) noktasına bırakmak zorundadır.

Bu çalışmanın temel amacı, birebir toplama ve dağıtım probleminde dizel ve elektrikli motora sahip heterojen araçların kullanıldığı farklı senaryoların incelenmesidir. Söz konusu senaryolarda, taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklanan dağıtım maliyetleri ile emisyon salınım miktarları üzerinden değerlendirmelerde bulunmaktadır. Bununla birlikte, taşımacılık faaliyetlerinde kullanılan elektrikli motora sahip araçların ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin, kurulacak güneş panellerinden üretilmesi durumu bir senaryo üzerinde değerlendirilmektedir.

Çalışmanın bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde, toplama ve dağıtım problemi üzerine yapılmış çalışmalar ile ilgili literatür taraması sunulmaktadır. Üçüncü bölümde, çalışmada üzerinde durulan birebir toplama ve dağıtım problemi tanımlanmakta ve problemin çözümü için matematiksel model önerilmekte ve tartışılmaktadır. Dördüncü bölümde, önerilen model için nümerik analizler sunulmaktadır. Sonuç bölümünde ise nümerik analizlerden elde edilen sonuçlara ilişkin genel değerlendirmeler ve yorumlar yer almaktadır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu çalışmada ele alınan birebir toplama ve dağıtım problemi birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Bu doğrultuda, literatürde birebir toplama ve dağıtım problemini konu alan çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Söz konusu çalışmalar kullanılan modeller, modellerin amaç fonksiyonları, dağıtım planında yer alan araçların tipleri ile sürdürülebilirlik kavramını ele alış biçimine göre detaylandırılmıştır. Tablo 1 ile birebir toplama ve dağıtım problemine ilişkin literatürdeki çeşitli çalışmalar sunulmaktadır.

Tablo 1’de görüldüğü üzere, ele alınan problemlerin çözümünde tercih edilen matematiksel model tipleri farklılaşmaktadır. İncelenen çalışmaların çoğunda tam sayılı ve karışık tam sayılı programlama modelleri tercih edilmiştir. Bununla birlikte sayısal çözüm yöntemi olarak Komşuluk Arama Algoritması, Tabu Araması Algoritması, Tavlama Benzetimi Algoritması ve Genetik Algoritma gibi sezgisel yaklaşımların da kullanıldığı gözlemlenmiştir.

İncelenen çalışmalarda sayısal çözüm için önerilen modellerde kullanılan amaç fonksiyonları değişiklik göstermektedir. Modellerin büyük bir bölümünde amaç fonksiyonu maliyetleri minimize etmek üzere oluşturulmuştur. Dikkate alınan maliyetler de sürücü maliyetleri, yakıt tüketim maliyetleri, zaman pencerelerinin varlığı durumunda bekleme maliyetleri ve ceza maliyetleri olmak üzere farklılaşmaktadır. Ek olarak, amaç fonksiyonunda katedilen mesafenin minimize edildiği çalışmalar da mevcuttur. Bunların yanı sıra, amaç fonksiyonunun maksimizasyon üzerine oluşturulduğu çalışmalar da görülmektedir.

Tablo 1’de sunulan çalışmalardan sürdürülebilirlik kavramının ele alındığı Soysal ve diğerleri (2018) ve Demir ve Van Woensel (2013) çalışmalarında çevreye verilen zararı ve karbon emisyonlarını en aza indirmek adına yakıt tüketim maliyetleri ile emisyon salınımlarının eş zamanlı olarak minimize edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, ele alınan problemlerde araç tipleri heterojen olmak ile birlikte bu araçların dizel motorlu olanlardan seçildiği, elektrik motorlu araçların tercih edilmediği görülmüştür.

Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak araç filosunun hem elektrikli hem de dizel araçları barındırdığı durum incelenmekte ve farklı senaryolar altında Karma Tamsayı Programlama modeli kullanılarak yakıt tüketimi ve emisyon salınımı açısından değerlendirmelerde bulunulmaktadır.

## 3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde, ele alınan birebir toplama ve dağıtım problemi tanımlanmakta ve ilgili problemin çözümü için önerilen matematiksel model sunulmaktadır.

### 3.1. Problem Tanımı

Çalışmada incelenen problem;  $V$  düğümler kümesi,  $A$  yaylar kümesi olmak üzere,  $G = \{V, A\}$  ağı üzerinde tanımlanmaktadır. Düğümler kümesi  $V = \{P, D, \{0, 2n + 1\}\}$  şeklinde tanımlanmıştır.  $P = \{1, \dots, n\}$  toplama noktaları kümesini,  $D = \{n + 1, \dots, 2n\}$  toplama noktalarındaki her bir elemana karşılık gelen dağıtım noktaları kümesini,  $\{0\}$  depoyu,  $\{2n + 1\}$  ise tüm araçların rotalarının sonunda depoya dönmesi için depo ile aynı lokasyonda oluşturulan sanal bir düğümü (yapay depo olarak adlandırılacaktır) temsil etmektedir.  $K = \{1, \dots, m\}$  araçlar kümesini ve  $Q_k$ ,  $k$  aracının taşıyabileceği yük kapasitesini ifade etmektedir. Yaylar kümesi ise  $A = \{(i, j): i = 0, j \in P \text{ veya } i, j \in P \cup D, i \neq j \text{ veya } i = n + j \text{ veya } i \in D, j = 2n + 1\}$  şeklinde tanımlanmaktadır (Cordeau ve diğerleri, 2008).

Birebir toplama ve dağıtım probleminde dağıtım faaliyetlerine konu olmuş her bir ürünün kendisine ait bir başlangıç ve varış noktasının olduğu kabul edilmektedir (Ayadi ve diğerleri, 2014). Tüm teslimat talepleri,  $i$  noktasının  $n + i$  noktasından önce ziyaret edilmesini gerektiren kısıta (öncelik ilişkisi) ve bu noktaların her ikisi de aynı araç tarafından ziyaret edilmesini gerektiren kısıta (eşleşme ilişkisi) bağlı olarak gerçekleştirilmelidir. Düğümler kümesindeki her bir nokta ( $i \in V$ );  $q_0 = q_{2n+1} = 0$  ve her bir toplama noktası için pozitif talep kısıtı  $q_i > 0$  ( $i \in P$ ) ve toplama noktalarına karşılık gelen her bir dağıtım noktası için negatif talep kısıtını  $q_i = -q_i - n$  ( $i \in D$ ) sağlayan  $q_i$  ile ifade edilen bir yük ile ilişkilendirilmektedir.

**Tablo 1. Birebir toplama ve dağıtım problemi üzerine yapılan çalışmalar**

<i>Çalışma</i>	<i>Model</i>	<i>Amaç Fonksiyonu</i>	<i>Araç Tipi</i>	<i>Sürdürülebilirlik</i>
Cordeau ve diğerleri (2008)	ve Tamsayılı Doğrusal Programlama, Dal Maliyet ve Kesme (Branch and Cut) Algoritması, Sezgiseller	Minimizasyonu	Homojen	–
Dumitrescu ve diğerleri (2010)	ve Tamsayılı Doğrusal Programlama, Dal Maliyet ve Kesme (Branch and Cut) Algoritması	Minimizasyonu	Homojen	–
Oncan ve diğerleri (2011)	ve Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama, Dal ve Kesme (Branch and Cut) Algoritması	Mesafe Minimizasyonu	Homojen	–
Demir ve Woensel (2013)	ve Karışık Tamsayılı Programlama	Doğrusal Yakıt Tüketimi ve Sürücü Maliyeti Minimizasyonu	Heterojen	Emisyon (Taşımadan Kaynaklı)
Mesa-Arango Ukkusuri (2013)	ve Karışık Tamsayılı Programlama, Dal ve Sınır (Branch and Bound) Algoritması	Doğrusal Maliyet Minimizasyonu	Homojen	–
Sahin ve diğerleri (2013)	Sezgiseller (Tabu Arama Search), Tavlama (Simulated Annealing)), Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama	(Tabu Arama Search), Tavlama Benzetimi Minimizasyonu	Homojen	–
Treleaven ve diğerleri (2013)	ve Polinom-Zaman /SPLICE Algoritması	Algoritmaları –	Homojen	–
Ayadi ve diğerleri (2014)	Dal ve Sınır (Branch and Bound) Algoritması	Servis Kalitesini Koruyarak Seyahat Süresi Minimizasyonu	Homojen	–
Guerriero ve diğerleri (2014)	ve Sezgiseller (Tabu Arama Search), Tavlama (Simulated Annealing), Genetik Algoritma (Genetic Algorithm))	(Tabu Sürücülerin Bekleme Sürelerinin Minimizasyonu)	Homojen	–
Iori ve Ledesma (2015)	Riera- Tamsayılı Sezgiseller	Doğrusal Programlama, Rotalama Maliyeti Minimizasyonu	Heterojen	–
Montero ve diğerleri (2017)	ve Tamsayılı Sezgiseller	Doğrusal Programlama, Maliyet Minimizasyonu	Homojen	–
Haddad ve diğerleri (2018)	ve Sezgiseller	Toplam Mesafe Minimizasyonu	Homojen	–
Soysal ve diğerleri (2018)	ve Karışık Tamsayılı Programlama	Doğrusal Toplam Teslimat Giderlerinin Minimizasyonu	Heterojen	Emisyon (Taşımadan Kaynaklı)
Factorovich ve diğerleri (2020)	ve Karışık Tamsayılı Programlama, Dal ve Kesme (Branch and Cut) Algoritması	Doğrusal Maliyet Minimizasyonu	Homojen	–
Castro ve diğerleri (2020)	ve Tamsayılı Doğrusal Programlama, Lagranj Dualitesi (İkiliği)	Mesafe Minimizasyonu	Homojen	–
Qi ve diğerleri (2020)	Karışık Tamsayılı Programlama, Sezgiseller (VND, VNS, MS_VND ve MS_VNS)	Doğrusal Kar Maksimizasyonu	Homojen	–
Xiong ve diğerleri (2020)	Tamsayılı Doğrusal Programlama, MS_VD Meta Sezgisel Algoritması	Fayda Maksimizasyonu	Homojen	–
Drexl (2021)	Sezgiseller (Komşuluk Arama Algoritması)	Maliyet Minimizasyonu	Heterojen	–
Graf (2021)	Sezgiseller	Mesafe Minimizasyonu	Homojen	–
Liu ve diğerleri (2021)	Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)	Maliyet Minimizasyonu	Heterojen	–
Bu çalışma	Karışık Tamsayılı Programlama	Doğrusal Maliyet Minimizasyonu	Heterojen (Dizel ve elektrikli araçlar)	Enerji Kullanımı ve Emisyon (Taşımadan Kaynaklı)

Düğüm kümesinin elemanları arasındaki uzaklık, yaylar kümesinde yer alan her bir ikili için  $((i, j) \in A)$   $d_{ij}$  ile ifade edilmektedir. Araçların kat edebilecekleri maksimum mesafe ise  $range_k$  ile temsil edilmektedir. Düğümler arasındaki yolculuk süresi, yaylar kümesinde yer alan her bir ikili için  $((i, j) \in A)$   $t_{ij}$  ile ifade edilmektedir. Düğümler kümesindeki her bir eleman  $(i \in V)$  için o noktada harcanan, doldurma, boşaltma vb. işlemleri içeren süre  $h_i$ , hizmet süresini ifade etmektedir. Sürücü maaşları araçların lojistik ağındaki seyahat sürelerine göre belirlenmektedir.

Birebir toplama ve dağıtım probleminde yer alan  $X$ , araç rota üzerinde ise 1, değilse 0 değerini alan ikili bir değişken olarak tanımlanmaktadır ( $X \in \{0,1\}$ ). Yapay depo haricinde aracın uğradığı tüm noktalardaki hizmete başladığı an ise  $Y$  değişkeni ile ifade edilmektedir.  $F$  değişkeni ile de aracın rota üzerindeki noktalar arasında taşınan yükün miktar ifade edilmektedir. Son olarak, aracın yük dağıtımını tamamlayarak tekrar depoya dönüş yaparken harcadığı toplam süre ise  $S$  değişkeni ile ifade edilmektedir. Tanımlanan bu problem ile, yukarıdaki varsayımlara uyularak yakıt tüketim ve sürücü maliyetlerinin minimize edildiği dağıtım planının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

### 3.2. Birebir Toplama ve Dağıtım Problemi için Karışık Tam Sayılı Doğrusal Programlama Modeli

Bu bölümde, tanımlanan birebir toplama ve dağıtım problemini matematiksel olarak ifade edebilmek adına Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama formülasyonu sunulmaktadır. Model için gerekli notasyon Tablo 2 ile verilmektedir.

**Tablo 2. Parametreler ve Karar Değişkenleri**

Sembol	Açıklama
$P$	Toplama noktaları kümesi, $P = \{1, \dots, n\}$
$D$	Dağıtım noktaları kümesi, $D = \{n + 1, \dots, 2n\}$
$V$	Tüm noktalar (düğümler) kümesi, $V = \{P \cup D \cup \{0, 2n + 1\}\}$
$A$	Noktalar arası tüm yollar (yaylar) kümesi, $A = \{(i, j) : i = 0, j \in P \text{ veya } i, j \in P \cup D, i \neq j \text{ ve } i \neq n + j \text{ veya } i \in D, j = 2n + 1\}$
$K$	Taşıma faaliyetleri için kullanılabilecek araçlar kümesi, $K = \{1, \dots, m\}$
$q_i$	$i \in P$ toplama noktasından alınıp $i + n \in D$ dağıtım noktasına taşınacak ürün miktarı (kg)
$Q_k$	$k \in K$ aracının kapasitesi (kg)
$t_{ij}$	$(i, j) \in A$ yolunun seyahat süresi (dk)
$h_i$	$i \in V$ noktasındaki hizmet süresi (dk)
$M$	Büyük bir sayı
$f_k$	$k$ aracının km başına yakıt tüketim maliyeti (TL/km)
$range_k$	$k$ aracının katedebileceği maksimum yol uzunluğu (km)
$d_{ij}$	Mesafe (km)
$wage$	Dakika başına sürücü maaşı (TL/dk)
$X_{ijk}$	$k \in K$ aracı $(i, j) \in A$ yolunda seyahat ediyor ise 1, etmiyor ise 0 değerini alan ikili değişken
$Y_{ik}$	$k \in K$ aracının $i$ noktasından $i \in V \setminus \{2n + 1\}$ hizmete başladığı an (dakika)
$F_{ijk}$	$k \in K$ aracının $(i, j) \in A$ yolunda taşıdığı yük miktarı (kilogram)
$S_{ik}$	$k \in K$ aracı dağıtım noktasına $i \in D$ ulaştıktan sonra depoya döndüğü rota üzerinde harcadığı toplam zaman (dakika)

Bu çalışmada ele alınan birebir toplama ve dağıtım problemi modeli Soysal ve diğerleri (2018)'de geliştirilen matematiksel model adapte edilerek geliştirilmiştir. Model, Soysal ve diğerleri (2018) tarafından önerilen modele göre farklı bir amaç fonksiyonu içermekte ve araçların maksimum yol alabileceği mesafeyi dikkate almaktadır. Önerilen matematiksel modelin formülasyonu amaç fonksiyonundan (Eşitlik 1) başlayarak aşağıda sunulmuştur:

Minimize (En küçük):

$$\sum_{j \in D} \sum_{k \in K} s_{j,k} wage + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} X_{i,j,k} d_{i,j} f_k \quad (1)$$

Eşitlik 1'de sunulan amaç fonksiyonu ile sürücü ve yakıt tüketim maliyetleri minimize edilmektedir. Amaç fonksiyonu, aşağıdaki kısıt kümesi dikkate alınarak eniyilenecektir.

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V : (i,j) \in A} X_{i,j,k} = 1, \quad \forall i \in P \quad (2)$$

$$\sum_{i \in P} X_{0,i,k} = \sum_{i \in D} X_{i,2n+1,k} = 1, \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V: (i,j) \in A} X_{i,j,k} - \sum_{j \in V: (n+i,j) \in A} X_{n+i,j,k} = 0, \quad \forall i \in P, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V: (j,i) \in A} X_{j,i,k} - \sum_{j \in V: (i,j) \in A} X_{i,j,k} = 0, \quad \forall i \in P \cup D, k \in K \quad (5)$$

$$Y_{i,k} \leq Y_{i+n,k}, \quad \forall i \in P, k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V: (j,i) \in A} F_{j,i,k} - \sum_{k \in K} \sum_{j \in V: (i,j) \in A} F_{i,j,k} = -q_i, \quad \forall i \in P \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V: (j,i) \in A} F_{j,i,k} - \sum_{k \in K} \sum_{j \in V: (i,j) \in A} F_{i,j,k} = q_{i-n}, \quad \forall i \in D \quad (8)$$

$$F_{i,j,k} - Q_k X_{i,j,k} \leq 0, \quad \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in P} F_{0,i,k} = 0 \quad (10)$$

$$Y_{i,k} - Y_{j,k} + h_i + t_{i,j} \leq M(1 - X_{i,j,k}), \quad \forall i, j \in V \setminus \{2n+1\}; (i,j) \in A, k \in K \quad (11)$$

$$Y_{j,k} + h_j - S_{j,k} + t_{j,2n+1} \leq M(1 - X_{j,2n+1,k}), \quad \forall j \in D, k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} X_{i,j,k} d_{i,j} \leq range_k, \quad \forall k \in K \quad (13)$$

$$X_{i,j,k} \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (14)$$

$$Y_{i,k} \geq 0, \quad \forall i \in V \setminus \{2n+1\}, k \in K \quad (15)$$

$$F_{i,j,k} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (16)$$

$$S_{i,k} \geq 0, \quad \forall i \in D, k \in K \quad (17)$$

Eşitlik 2-4 ile numaralandırılmış kısıtlar ile her bir toplama noktasına aynı aracın sadece bir kez uğraması sağlanmaktadır. Eşitlik 3-5 numaralı kısıtlar, her bir aracın rotasının depodan başlayıp depoda bitirilmesini garanti eden kısıtlardır. Eşitlik 6'da verilen kısıt,  $k$  aracını depodan ayrılır ayrılmaz öncelikle toplama noktasına uğramaya zorlamaktadır.

Eşitlik 7 ve 8 ile numaralandırılmış kısıtlar, toplama ve dağıtım noktalarındaki akışın korunumu sağlamaktadır. Eşitlik 7'de verilen kısıt ile toplama noktalarındaki arzın ve Eşitlik 8'de verilen kısıt ile de dağıtım noktalarındaki talebin doğru bir şekilde karşılanması sağlanmaktadır. Eşitlik 9'da verilen kısıt ile  $k$  aracı için araç kapasitesinin aşılmaması sağlanmaktadır. Eşitlik 10 ile verilen kısıt kümesi,  $k$  aracı depodan harekete başlarken herhangi bir yük taşımadığını, boş olduğunu belirtmektedir.

Eşitlik 11 ve 12 ile numaralandırılmış kısıt kümeleri,  $k$  aracı için rotadaki toplama ve dağıtım noktalarının ziyaret edildiği zamanlar, noktalar arası seyahat süreleri ve bu noktalardaki hizmet süreleri göz önünde bulundurularak oluşturulan zaman kısıtlarıdır. Büyük  $M$  değeri ile çok büyük bir sayı ifade edilmekte ve kısıtın sağ tarafı için yüksek bir sayısal değere ulaşılması hedeflenmektedir. Eşitlik 13'te verilen kısıt ile  $k$  aracı için önceden belirlenmiş kilometre limitinin aşılamayacağı gösterilmektedir. Son olarak, Eşitlik 14-17 ile verilen kısıtlar karar değişkenlerine uygulanan sınırlamaları ifade etmektedir.

#### 4. NÜMERİK ANALİZLER

Bu bölümde ele alınan nümerik analizler ile çalışma kapsamında önerilen modelin uygulanabilirliğini ortaya koyabilmek, kullanımından sağlanacak faydaları sunabilmek ve farklı senaryolar altında dağıtım faaliyetlerinden kaynaklanan emisyon salınımı ve yakıt tüketimi göstergeleri üzerinden değerlendirmelerde bulunabilmek amaçlanmıştır. Çalışmada ele alınan birebir toplama ve dağıtım problemi üzerine önerilen matematiksel model IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6.1 optimizasyon paketi ile çözülmüştür. Optimal çözümler, 8 GB belleğe ve 64 bit işletim sistemine sahip, Intel Core i5-3210M 2,50 GHz işlemcili bir bilgisayardan elde edilmiştir.

##### 4.1. Örnek Problem ve Çözümü

Nümerik analizler çerçevesinde, öncelikle örnek bir problem oluşturulup çözülmüştür. Ardından elde edilen çözümler ile ilgili performans göstergeleri üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır.

##### 4.1.1. Örnek Problem ve Kullanılan Veri Setinin Tanıtılması

Çalışma kapsamında ele alınan örnek problem, Southampton Üniversitesi bünyesindeki "The Pollution-Routing Problem Instance Library" adlı kütüphaneden elde edilmiştir (PRP Kütüphanesi, 2020). Problemin çözümü için kurulan matematiksel modelde yer alan parametrelerin değerleri, birimleri ve kaynakları Tablo A1'de verilmektedir.

Örnek problemde, deponun temsil edildiği bir nokta, yedi adet toplama noktası ( $P = \{P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7\}$ ), 7 adet dağıtım noktası ( $D = \{D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7\}$ ) ve seyahatin

tamamlanabilmesi adına depoya geri dönüldüğünü temsil eden bir yapay depo noktası bulunmaktadır. Problem kapsamında, yükler hangi sıradaki toplama noktasından alındıysa aynı sıradaki dağıtım noktasına teslim edilmektedir.  $P1$  toplama noktasından alınacak yük,  $D1$  dağıtım noktasına teslim edilmelidir ( $P1 - D1$ ). Bu doğrultuda, oluşacak diğer teslimat ilişkileri ( $P2 - D2$ ), ( $P3 - D3$ ), ( $P4 - D4$ ), ( $P5 - D5$ ), ( $P6 - D6$ ) ve ( $P7 - D7$ ) şeklinde olmak durumundadır. Depo, toplama noktaları, dağıtım noktaları ve yapay depo tüm noktalar kümesini oluşturmaktadır ( $V = \{Depo, P, D, Yapay\ Depo\}$ ).

Toplama ve dağıtım faaliyetlerini gerçekleştirmek üzere problemde iki adet aracın ( $K1$  ve  $K2$ ) bulunduğu varsayılmıştır. Söz konusu araçlar hareketlerine depodan başlamak şartıyla toplama ve dağıtım noktaları arasında seyahat edebilmektedir. Bu araçlardan ilki ( $K1$ ) yük taşımacılığına elverişli dizel bir motora sahip iken, ikincisi ( $K2$ ) ise elektrikli bir motora sahiptir. 10 kWsa kapasiteye sahip sekiz adet 6V & Alke ATX 320E modeli (Alke, 2020) dağıtım faaliyetlerinde kullanılacak elektrik motorlu araç olarak belirlenmiştir (Tablo A1).

Her bir toplama noktasından alınarak ilgili dağıtım noktalarına taşınacak yük miktarları Tablo 3'te verilmektedir. Tüm noktalar için belirlenmiş hizmet süreleri ise Tablo 4'te sunulmaktadır.

**Tablo 3. Toplama noktaları kümesi için yük miktarları (kg)**

$P$	$P1$	$P2$	$P3$	$P4$	$P5$	$P6$	$P7$
Yük (kg)	200	400	500	350	450	550	150

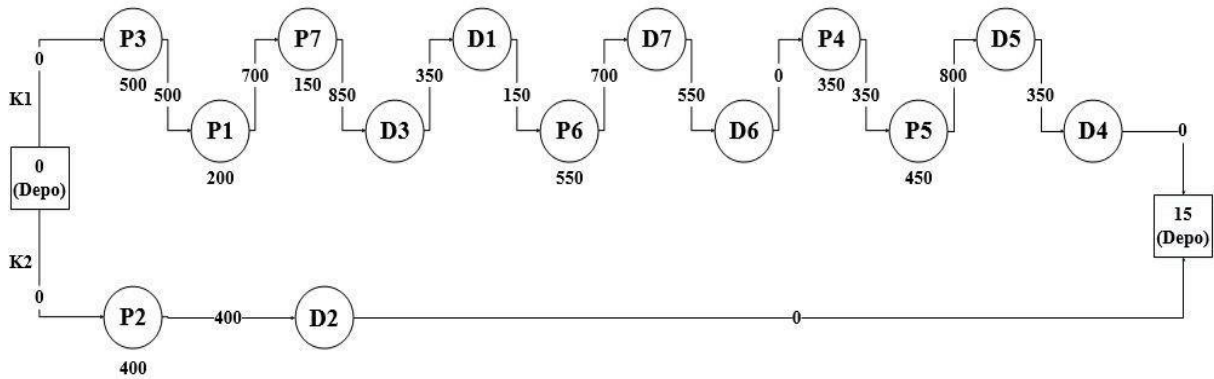
**Tablo 4. Tüm noktalar kümesindeki her bir nokta için hizmet süreleri (dk)**

$V$	Depo	$P1$	$P2$	$P3$	$P4$	$P5$	$P6$	$P7$	$D1$	$D2$	$D3$	$D4$	$D5$	$D6$	$D7$	Yapay Depo
Hizmet Süresi (dk)	0	5,9	13,2	23,1	11,5	26,1	26,7	20,3	7,2	11,5	24,9	15,7	3,4	16,2	13,6	20,9

Tüm noktalar arası mesafeler ( $d_{ij}$ ) Tablo A2'de sunulmaktadır. Araç seyahat hızının ortalama 80 km/sa olduğu varsayımı altında, noktalar arası mesafelerin de ortalama araç seyahat hızına bölünmesi ile seyahat süreleri ( $t_{ij}$ ) hesaplanmıştır (Tablo A3).

#### 4.1.2. Örnek Problem Sonuçları

Örnek problemin optimal çözümü yaklaşık olarak 1 saat 12 dakikada elde edilmiştir. Elde edilen çözümde sürücü maliyeti 450,05 TL ve yakıt maliyeti 550,52 TL olmak üzere toplam maliyet 1000,57 TL olarak belirlenmiştir. Şekil 1'de araçların taşıdıkları yük miktarları ve izledikleri rota verilmektedir.



**Şekil 1. Örnek problem için K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izlediği rota ve taşıdıkları yük miktarları**

Dizel motora sahip birinci araç ( $K1$ ) için kat edilen mesafe 541,37 km iken, seyahat süresi 601,02 dakikadır. Elektrikli motorlu ikinci araç ( $K2$ ) ise 299,07 dakikada 365,79 km seyahat etmiştir.  $K1$  aracı 6 adet toplama-dağıtım noktası çifti ( $i-j$ ) için,  $K2$  aracı ise 1 adet toplama-dağıtım noktası çifti ( $i-j$ ) için hizmet vermiştir. Tablo 5'te  $K1$  ve  $K2$  araçlarının rotası, hangi noktalarda (yayda) ne kadar yük taşıdığı ve  $j$  noktasına varış süreleri sunulmaktadır.



**Tablo 5. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) aracının rotası, taşıdığı yük miktarı, j noktasına varış zamanı ve seyahat ettiği yol**

Araçlar	<i-j>	Yük (kg)	j noktasına varış zamanı (dk)	Seyahat edilen yol (km)
K1	<Depo-P3>	0	68,58	91,44
	<P3-P1>	500	169,4	195,07
	<P1-P7>	700	186,79	210,35
	<P7-D3>	850	213,77	219,26
	<D3-D1>	350	258,32	245,41
	<D1-P6>	150	271,53	253,42
	<P6-D7>	700	313,74	274,02
	<D7-D6>	550	353,16	308,35
	<D6-P4>	-	377,09	318,66
	<P4-P5>	350	405,93	341,73
	<P5-D5>	800	476,85	401,41
	<D5-D4>	350	531,83	470,13
	<D4-Yapay Depo>	-	601,02	541,37
K2	<Depo-P2>	0	69,56	92,75
	<P2-D2>	400	186,09	230,48
	<D2-Yapay Depo>	-	299,07	365,79

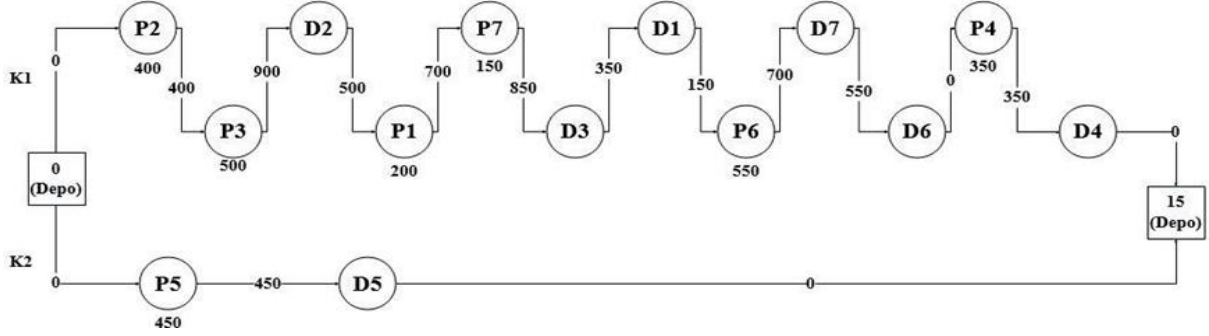
#### 4.2. Duyarlılık Analizleri

Duyarlılık analizleri kapsamında, ele alınan modelde yer alan temel parametre değerleri (aracın kapasitesi, yakıt maliyeti, aracın kat edebileceği maksimum yol ve toplama-dağıtım noktaları) üzerinde değişimler yapılarak, bu değişimlerin temel performans göstergeleri ve dağıtım planı üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, önceki bölümde sunulan örnek problem ana senaryo olarak kabul edilmiş ve modeldeki ilgili temel parametreler üzerinde değişimlerin yapıldığı 8 farklı senaryo oluşturulmuştur.

Araç kapasitesi parametrelerindeki yapılacak değişiklikler üzerine oluşturulan birinci ve ikinci senaryolardan ilkinde (C1), araç kapasitesi hem dizel hem de elektrikli araç için yarıya düşürülerek problem çözülmüştür. İkinci senaryoda (C2) ise araç kapasitesi 1,5 katına çıkarılmıştır. Örnek problemin optimal çözümü ile karşılaştırıldığında, C1'de sürücü ve yakıt maliyetlerinin arttığı görülürken, C2'de ise sürücü ve yakıt maliyetlerinin düştüğü görülmüştür. Aynı şekilde, C1'de CO<sub>2</sub> emisyon salınımı değeri artarken, C2'de düşmüştür.

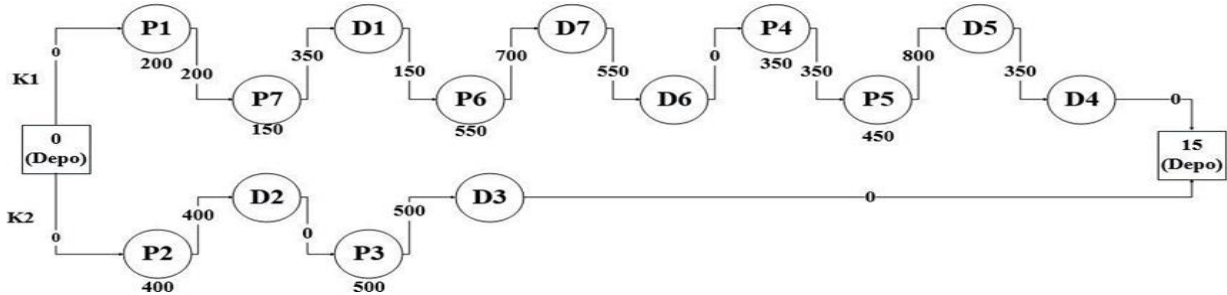
Üçüncü (F1) ve dördüncü (F2) senaryolarda ise yakıt maliyeti parametresindeki değişimlerin etkisi incelenmiştir. Söz konusu senaryolardan ilkinde (F1), yakıt maliyeti yarıya düşürülerek problem çözülmüştür. Bu modelin çözümü ile örnek problemdeki karşılaştırıldığında, yakıt maliyeti değeri örnek problemdeki değerin yarısı kadar hesaplanırken, yakıt maliyeti dışındaki amaç fonksiyonu değerlerinin, araçların kat ettikleri yolun ve dağıtım planının birebir aynı kaldığı gözlenmiştir. Benzer şekilde, yakıt maliyeti parametresinin 1,5 katına çıkarıldığı varsayılan dördüncü senaryoda (F2) örnek problem ile yalnızca yakıt tüketimi açısından farklılık göstererek yakıt maliyetinin 1,5 kat arttığı, dağıtım planı ve diğer amaç fonksiyonu değerlerinin değişmediği sonucuna ulaşılmıştır.

Rotalar ve amaç fonksiyonu değerleri üzerindeki etkisini incelemek adına, elektrikli motora sahip araçlar için araçların katedebilecekleri maksimum yol parametresi üzerinde değişimlerin yapıldığı beşinci (R1) ve altıncı (R2) senaryolar kurulmuştur. Bunlardan ilkinde (R1), 2 numaralı aracın örnek problemde maksimum alabileceği yol 400 km'den 300 km'ye düşürülerek problem çözülmüştür. İkinci araç için katedilebilecek maksimum yol parametresindeki değişiklik ile örnek problemin çözümüne göre farklı rotalar oluşmuş, sürücü ve yakıt maliyetlerinin her ikisinin de arttığı görülmüştür. Ek olarak, ana senaryoya göre CO<sub>2</sub> salınım değerinde de artış görülmüştür. Araçlar için noktalar arası yük miktarı ve izlenen rota Şekil 2'de verilmektedir.



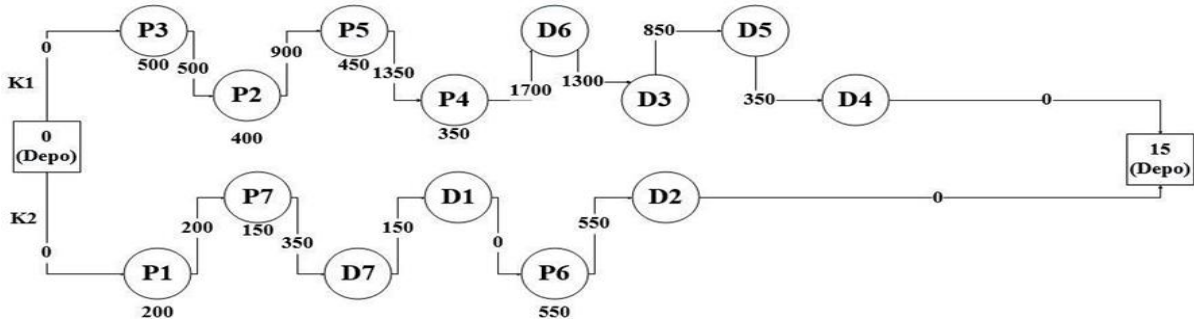
Şekil 2. R1'e göre K<sub>1</sub> (dizel) ve K<sub>2</sub> (elektrikli) araçlarının izledikleri rota ve taşıdıkları yük miktarları

Elektrikli motora sahip 2 numaralı aracın katedebileceği maksimum yolun 400 km'den 600 km'ye çıkarılması ile oluşturulan altıncı senaryonun (R2) çözümünde, örnek probleme göre sürücü maliyetinin arttığı, yakıt maliyetinin ve CO<sub>2</sub> salınım değerinin ise azaldığı gözlemlenmiştir. Altıncı senaryonun çözümü ile elde edilen dağıtım planındaki araç rotaları ve noktalar arasındaki yük miktarları Şekil 3'te gösterilmektedir.



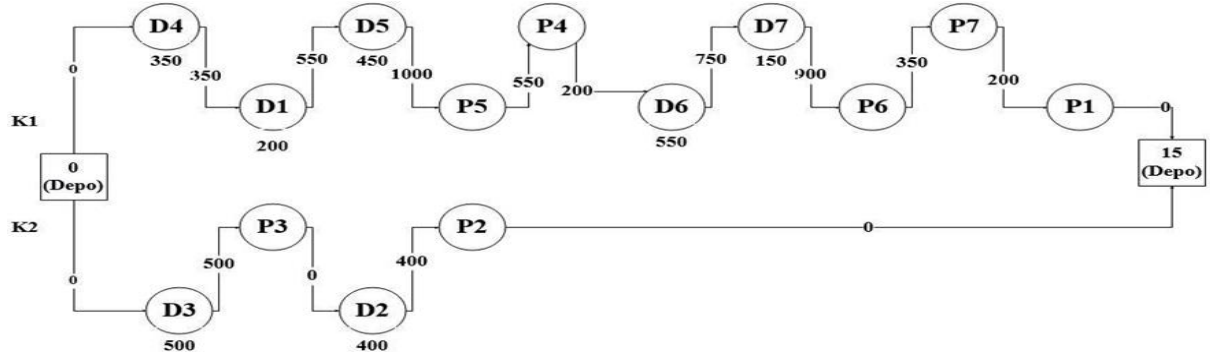
Şekil 3. R2'ye göre K<sub>1</sub> (dizel) ve K<sub>2</sub> (elektrikli) araçlarının izledikleri rota ve taşıdıkları yük miktarları

Son olarak, oluşturulan yedinci (PD1) ve sekizinci (PD2) senaryolarda toplama ve dağıtım noktalarında yapılacak değişikliklerin amaç fonksiyonu değerleri ve rotalar üzerindeki etkisi incelenmiştir. PD1'de dağıtım noktaları ardışık olarak tersten sıralanarak toplama noktaları ile eşleştirilmiştir. Örnek problemdeki toplama ve dağıtım noktalarındaki ikili eşleşmeler (P1-D1) (P2-D2) (P3-D3) (P4-D4) (P5-D5) (P6-D6) (P7-D7) şeklinde iken, bu senaryoda noktalar arasındaki eşleşmeler (P1-D7) (P2-D6) (P3-D5) (P4-D4) (P5-D3) (P6-D2) (P7-D1) şeklindedir. Örnek problemin optimal çözümündeki skorlar ile kıyaslandığında, yedinci senaryoda (PD1) CO<sub>2</sub> emisyon salınımı değerinin, sürücü ve yakıt maliyetlerinin arttığı görülmüştür. Şekil 4'te araçların noktalar arası taşıdıkları yük miktarı ve izledikleri rota sunulmaktadır.



Şekil 4. PD<sub>1</sub>'e göre K<sub>1</sub> (dizel) ve K<sub>2</sub> (elektrikli) araçlarının izledikleri rota ve taşıdıkları yük miktarları

Oluşturulan sekizinci senaryoda (PD2) ise, toplama noktaları ile dağıtım noktaları yer değiştirilerek çözülmüştür. Örnek problemdeki eşleştirmelerden farklı olarak, bu senaryoda dağıtım ve toplama noktaları ikili olarak (D1-P1) (D2-P2) (D3-P3) (D4-P4) (D5-P5) (D6-P6) (D7-P7) şeklinde eşleştirilmiştir. Örnek problemde toplama noktası olan noktaların dağıtım noktası, dağıtım noktası olanların da toplama noktası olarak tasarlandığı bu senaryoda, sürücü maliyetlerinin, yakıt tüketiminin ve emisyon salınım değerlerinin düştüğü görülmüştür. Araçların izleyecekleri rota ve taşınan yük miktarları Şekil 5'te verilmektedir. Tablo 6 ile oluşturulan tüm senaryolar ve elde edilen optimal çözümler sunulmaktadır.



Şekil 5. PD<sub>2</sub>'ye göre K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota ve taşıdıkları yük miktarları

Tablo 6. Senaryolar, araçların izledikleri rota, sürücü maliyeti, yakıt maliyeti, toplam maliyet, CO<sub>2</sub> emisyon değerleri ve örnek senaryoya kıyasla maliyet ve emisyon değerleri farkı

Senaryo	Araç	Rota	SM (TL)	YM (TL)	TM (TL)	CO <sub>2</sub> (Kg)	MF (%)	EF (%)	RD	ÇS (dk)
Örnek Problem	K1	D-P3-P1-P7-D3-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-YD	450,05	550,52	1000,57	231,04	-	-	-	72
	K2	D-P2-D2-YD								
C1 (Yarı Kapasite)	K1	D-P2-P3-D2-P1-D3-P6-D1-D6-P4-P5-D5-D4-YD	460,46	689,25	1149,71	279,06	14,91	20,78	✓	38
	K2	D-P7-D7-YD								
C2 (1,5 Katı Kapasite)	K1	D-P2-P3-D2-D3-YD	447,53	514,91	962,44	218,73	-3,81	-5,33	✓	57
	K2	D-P1-P7-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-YD								
F1 (Yarı Yakıt Maliyeti)	K1	D-P3-P1-P7-D3-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-YD	450,05	275,26	725,31	231,04	-27,51	0		441
	K2	D-P2-D2-YD								
F2 (1,5 Katı Yakıt Maliyeti)	K1	D-P3-P1-P7-D3-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-YD	450,05	825,78	1275,83	231,04	27,51	0		11
	K2	D-P2-D2-YD								
R1 (300 km Maksimum Yol)	K1	D-P2-P3-D2-P1-P7-D3-D1-P6-D7-D6-P4-D4-YD	457,66	659,71	1117,37	268,75	11,67	16,32	✓	69
	K2	D-P5-D5-YD								
R2 (600 km Maksimum Yol)	K1	D-P1-P7-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-YD	462,31	409,01	871,32	185,16	-12,92	-19,86	✓	28
	K2	D-P2-D2-P3-D3-YD								
PD1 (Dağıtım Noktaları)	K1	D-P3-P2-P5-P4-D6-D3-D5-D4-YD	466,33	581,67	1048	243,71	4,74	5,48	✓	113
	K2	D-P1-P7-D1-D7-P6-D2-YD								
PD2 (Toplama Noktaları)	K1	D-D4-D1-D5-P5-P4-D6-D7-P6-P7-P1-YD	428,82	431,72	860,54	184,79	-14	-20,02	✓	40
	K2	D-D3-P3-D2-P2-YD								

D: Depo, YD: Yapay Depo, SM: Sürücü Maliyeti, YM: Yakıt Maliyeti, TM: Toplam Maliyet, CO<sub>2</sub>: Karbondioksit Eşdeğer Emisyon, MF: Maliyet Farkı, EF: Emisyon Farkı, RD: Rota Değişikliği, ÇS: Çözüm Süresi

Tablo 6'ya göre, 8 farklı senaryoda elde edilen rotalar ile ana senaryo olarak varsayılan örnek problemdeki rotalar karşılaştırıldığında, 6 adet senaryoda dağıtım planlarının değiştiği ve toplamda ise 6

farklı dağıtım planı olduğu gözlemlenmiştir. Oluşturulan söz konusu senaryoların optimal çözümleri ile örnek problemdeki karşılaştırıldığında amaç fonksiyonu değerlerinde de değişimler olduğu görülmüştür. Bu değişimler, bazı senaryolarda farklı dağıtım planlarının oluşması ve araçların farklı mesafelerde seyahat etmesinden kaynaklanırken, bazı senaryolarda ise (F1 ve F2) dağıtım planları sabit kalarak sadece yakıt tüketimi parametresinde yapılan değişikliklerden kaynaklanmıştır. Ana senaryonun optimal çözümündeki toplam maliyetten %27,51 oranında daha düşük değere sahip üçüncü senaryo (F1) en düşük maliyetli senaryo olurken, %27,51 oranında daha yüksek değer alan dördüncü senaryo (F2) maliyeti en yüksek senaryo olmuştur. Örnek problemin çözümü ile kıyaslandığında, CO<sub>2</sub> emisyonu salınımının en fazla olduğu senaryo %20,78 oranında daha yüksek değere sahip ilk (C1) senaryo iken, en düşük salınıma sahip senaryo ise %20,02 daha az değerle sekizinci senaryo (PD2) olmuştur.

### 4.3. Sürdürülebilirlik Üzerine Senaryo Analizleri

Bu bölümde, lojistik ağında içinde elektrikli araçların da olduğu araçların tipleri ve sayıları değiştirilerek farklı senaryolar oluşturulmuştur. Sürdürülebilir yük taşımacılığı açısından, her bir senaryo için emisyon değerleri ile yakıt maliyetleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, elektrikli araçlar için gerekli enerjinin güneş panelleri ile sağlandığı bir varsayım üzerinden karşılaştırmalı maliyet analizi gerçekleştirilmiştir.

#### 4.3.1. Farklı Senaryolarda Yakıt Maliyeti ve Emisyon Karşılaştırılması

Sürdürülebilir yük taşımacılığı kapsamında, lojistik ağı içinde farklı sayılarda dizel ve elektrik motorlu araçların kullanıldığı (dolayısıyla elektrikli araçların filo içerisindeki ağırlığının değiştiği) dört farklı senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolardan üçüncüsü daha önceden çözülen, bir adet dizel ve bir adet elektrik motorlu aracın kullanıldığı örnek problemidir. Tablo 7'de incelenen senaryolardaki araç sayıları, motor tipleri ve kapasite bilgileri verilmektedir.

**Tablo 7. Senaryolardaki araç sayıları, motor tipleri ve araç kapasiteleri**

Senaryo	Araçların Sayısı, Motor Tipleri ve Kapasiteleri
Senaryo-1	1 adet dizel motorlu araç (3650 kg kapasite)
Senaryo-2	2 adet dizel motorlu araç (3650 kg kapasite)
Senaryo-3 (Örnek Problem)	1 adet dizel motorlu ve 1 adet elektrik motorlu araç (3650 kg ve 635 kg kapasite)
Senaryo-4	4 adet elektrik motorlu araç (635 kg kapasite)

Senaryoların optimal çözümleri ile araçların kat ettikleri toplam mesafe, izledikleri rota, taşıdıkları yük miktarları, yakıt tüketimleri, yakıt maliyetleri ve CO<sub>2</sub> emisyon değerleri hesaplanmıştır. Ek olarak, dağıtım faaliyetlerinin bir yıl içerisinde 250 günde gerçekleştirildiği varsayılarak yakıt maliyetleri belirlenmiştir (OPET, 2020).

Bir adet dizel motora sahip aracın kullanıldığı ilk senaryo için optimal çözümde katedilen toplam mesafe 689,21 km ve tüketilen yakıt miktarı 101,35 lt'dir. İki adet dizel motorlu araç kullanılan ikinci senaryoda birinci araç 395,4 km ve ikinci araç 505,02 km olmak üzere toplamda 900,42 km yol kat etmişlerdir. Birinci senaryo sonuçları ile karşılaştırıldığında, dağıtım planında bir adet yerine iki aracın kullanımının yüksek maliyetli olduğu ve de çevreye daha çok zarar verdiği görülmüştür. Üçüncü senaryonun çözümüne göre dizel motora sahip araç 541,37 km mesafe kat ederek 79,61 litre yakıt kullanmış, elektrik motora sahip araç ise 365,79 km seyahat ederek 73,15 kWsa elektrik kullanmıştır. Son olarak, dağıtım planında dört adet elektrik motorlu aracın kullanıldığı dördüncü senaryoda optimal çözümde araçların kat ettikleri mesafeler birinci araç için 365,79 km, ikinci araç için 274,61 km, üçüncü araç için 382,84 km ve dördüncü araç için 355,30 km olmak üzere toplamda 1378,54 km'dir. Her bir senaryo için dağıtım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi için varsayılan 250 günlük süreçte hesaplanan toplam yakıt maliyeti, tüketim miktarları ve emisyon salınım değerleri Tablo 8'de sunulmaktadır.

**Tablo 8. Toplam enerji kullanımı, yakıt maliyeti ve CO<sub>2</sub> emisyon değerleri**

Senaryo	Çözüm Süresi	Yıllık Toplam Yakıt Maliyeti	Yıllık Toplam Enerji Kullanımı	Yıllık Toplam CO <sub>2</sub> Emisyon Salınımı
Senaryo-1	114 dk	172.302,5 TL	25.338,60 lt	66.640,53 kg
Senaryo-2	198 dk	225.105 TL	33.103,68 lt	87.062,67 kg
Senaryo-3	72 dk	137.630 TL	19.903,31 lt/18.289,50 kWsa	57.759,39 kg
Senaryo-4	0,42 dk	8.615 TL	68.927,20 kWsa	20.402,45 kg

Tablo 8 incelendiğinde, dört farklı senaryo arasında sadece elektrikli motora sahip araçların kullanıldığı dördüncü senaryodaki yakıt maliyetlerinin ve CO<sub>2</sub> emisyon salınımı değerlerinin diğer senaryolara oranla daha düşük değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre, araç bakım ve satın alma maliyetlerinin ihmal edilerek yalnızca yakıt maliyetleri açısından değerlendirildiğinde, elektrikli motora sahip araçların dizel motora sahip araçlara göre daha avantajlı olduğu görülmüştür.

#### 4.3.2. Güneş Panelleri ile Elektrik Üretimi Üzerinden Bir Maliyet Analizi

Bu bölümde, dağıtım faaliyetlerinde kullanılan elektrikli motora sahip araçların elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilmek adına güneş panelleri kurulumu için bir maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Bir önceki bölümde yer alan dört adet elektrik motorlu aracın kullanıldığı senaryo esas alınarak yıllık elektrik enerjisi ihtiyacının ortalama 70.000 kWsa olduğu varsayımında bulunulmuştur (Tablo 8). İhtiyaç duyulan bu miktarı üretebilmek için 10 kW'lık 5 adet güneş panelinin kurulması öngörülmüştür. 10 kW güneş paneli ortalama olarak günde 29-46 kWsa elektrik üretmektedir (SolarReviews, 2020). Bu miktar hesaplama kolaylığı açısından günde 40 kWsa olarak belirlenmiş, bir adet güneş panelinin yılda 14.600 kWsa, beş adet güneş panelinin ise 73.000 kWsa enerji ürettiği varsayılmıştır.

10 kW'lık bir güneş panelinin kurulum maliyeti Amerika Birleşik Devletleri'nde ortalama 2.300 \$'dır (SolarReviews, 2020). Buna göre, bakım maliyetlerinin göz ardı edildiği durumda, 5 adet güneş paneli kurulum maliyeti 115.000 \$ olmaktadır. Diğer taraftan, Amerika Birleşik Devletleri'nde elektrik enerjisi için kWsa başına 0,12 \$ ödenmektedir (EIA, 2020). Elektrik enerjisinin üretilmeyip satın alındığı durumda, 70.000 kWsa enerjiye karşılık yıllık 8.400 \$'lık bir maliyet oluşacaktır. 8.400 \$'ın yıllık yakıt maliyeti olarak kabul edilmesi ile yapılan başa baş analizine göre güneş panellerine yapılacak bir yatırımın yaklaşık 13 yıl sonra karşılanacağı görülmüştür.

Birçok şirket, minimum kabul edilebilir getiri oranı %15 ve üzerinde olan yatırım ve projeleri kabul etmekte, bu oranın altında kalanları tercih etmemektedir (Nahmias ve Olsen, 2015). Güneş panelleri kurulumu için yapılacak yatırımın finansal açıdan avantajlı olup olmadığını belirlemek adına güneş panellerinin kullanım ömürlerine bağlı olarak yıllık getiri miktarları üzerinden minimum kabul edilebilir getiri oranı hesaplanmıştır. Enerjinin satın alınması yerine üretilmesi durumunda ödenmeyecek 8.400 \$, yıllık getiri miktarı olarak belirlenmiştir. Finansal riskler ve enflasyon gibi dış faktörleri ihmal ederek, güneş panellerinin yaklaşık ömürlerinin 30, 35 ve 40 yıl olduğu varsayımı altında hesaplanan yıllık indirgenmiş getiri miktarları ve iç verim oranları Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9'da görüldüğü üzere, güneş panellerinin kullanım ömürleri esas alınarak iç verim oranları sırasıyla %6,05, %6,50, ve %6,77 olarak hesaplanmış ve %15 kritik oranın altında kalması nedeniyle finansal açıdan bu yatırımın avantajlı olmadığı görülmüştür.

Getiri miktarları için daha gerçekçi bir hesaplama yapabilmek adına, yıllık enflasyon oranlarının dahil edilerek güneş panellerine yapılacak yatırımın iç verim oranları yeniden belirlenmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki son on yıllık enflasyon oranları dikkate alınarak, bu oranların %1, %2 ve %3 olduğu durumlar üzerinden iç verim oranları belirlenmiştir (UsInflationCalculator, 2020). Güneş panelleri için yaklaşık kullanım ömürlerinin 30, 35 ve 40 yıl olduğu varsayımında, yıllık getiri miktarları enflasyon oranlarındaki yükselişe bağlı olarak artmaktadır. Yıllık enflasyon oranlarına karşılık gelen yıllara göre iç verim oranları Tablo 10'da sunulmaktadır.

Tablo 10'a göre yıllık farklı enflasyon oranlarına göre hesaplanan iç verim oranlarının hâlâ %15 kritik oranının altında olmasından ötürü finansal açıdan bu yatırım olumlu görülmemektedir. Fakat, bu yatırım için yapılan maliyet analizinin küçük bir ölçek üzerinde gerçekleştirildiği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durum, girdi(ler) üzerindeki yapılan bir değişimin çıktı(lar) üzerindeki etkisi olarak tanımlanan ölçeğe göre getiri kavramı üzerinden yorumlanabilmektedir. Girdilerdeki oransal bir artış, çıktılar üzerinde daha fazla bir artış sağlıyorsa ölçeğe göre artan bir getiriden söz edilebilmektedir (Førsund ve Hjalmarsson, 2004). Güneş paneli yatırımı açısından yorumlamak gerekirse, daha çok elektrik üretmek için kurulacak güneş panelleri ile ölçek büyüyecek ve bu büyümenin getirilerde daha fazla bir oransal artış sağlaması ile iç verim oranları çok daha yüksek değerlere ulaşacaktır. Ek olarak, ihtiyaç duyulan miktardan daha fazla elektrik enerjisi üretim kararı alınması durumunda, ihtiyacın dışında kalan miktarın satılarak kazanç elde edilmesi ile getirilerde artış sağlanabilecektir.

**Tablo 9. Güneş panellerinin yıllık indirgenmiş getiri miktarları ve iç verim oranları**

Yıllar	Güneş panellerinin yaklaşık ömrü		
	30 yıl	35 yıl	40 yıl
1	7920,74	7887,49	7867,13
2	7468,82	7406,25	7368,06
3	7042,69	6954,38	6900,65
4	6640,87	6530,07	6462,9
5	6261,98	6131,65	6052,91
6	5904,7	5757,54	5668,93
7	5567,81	5406,26	5309,31
8	5250,14	5076,41	4972,5
9	4950,59	4766,68	4657,06
10	4668,14	4475,85	4361,63
11	4401,8	4202,77	4084,94
12	4150,66	3946,35	3825,81
13	3913,84	3705,57	3583,11
14	3690,54	3479,48	3355,81
15	3479,97	3267,19	3142,92
16	3281,43	3067,85	2943,55
17	3094,2	2880,67	2756,82
18	2917,67	2704,91	2581,93
19	2751,2	2539,88	2418,14
20	2594,23	2384,91	2264,74
21	2446,22	2239,4	2121,07
22	2306,65	2102,77	1986,52
23	2175,04	1974,47	1860,5
24	2050,95	1854,01	1742,47
25	1933,93	1740,89	1631,94
26	1823,59	1634,67	1528,41
27	1719,55	1534,94	1431,45
28	1621,44	1441,28	1340,65
29	1528,93	1353,35	1255,6
30	1441,69	1270,78	1175,95
31		1193,24	1101,35
32		1120,44	1031,48
33		1052,08	966,05
34		987,89	904,77
35		927,61	847,37
36			793,62
37			743,27
38			696,12
39			651,96
40			610,6
Toplam Getiri (\$)	115000	115000	115000
İç Verim Oranı (%)	6,05	6,50	6,77

**Tablo 10. Güneş panelleri için farklı enflasyon oranları ile hesaplanmış iç verim oranları**

Enflasyon Oranı(%)	1			2			3		
Yıllar	30	35	40	30	35	40	30	35	40
İç Verim Oranı (%)	7,02	7,47	7,76	7,98	8,45	8,74	8,95	9,43	9,72

## 5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, araç rotalama probleminin türlerinden biri olan birebir toplama ve dağıtım problemi modellenmiş ve analiz edilmiştir. Birebir toplama ve dağıtım problemi ile ilgili önceki çalışmalardan farklı olarak, tüm araçların dizel ve elektrikli motora sahip olduğu kabul edilmektedir. Çalışmada, farklı senaryolarda taşımacılık ile ilgili aktivitelerden kaynaklanan emisyon salınımı ve yakıt tüketimi göstergeleri üzerinden değerlendirmelerde bulunabilmek adına Karışık Tam Sayılı Programlama modeli kullanılmıştır. Bu yönleri ile çalışmanın sürdürülebilir lojistik yönetimine katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Çalışmadaki nümerik analizler kapsamında ilk olarak bir adet depo, bir adet yapay depo, toplama ve dağıtım noktalarının oluşturduğu örnek bir araç rotalama problemi çözülmüştür. Sonrasında, çözülen bu problemin değişen parametrelerinin dağıtım planını ve optimal çözümü hangi ölçüde değiştirdiğini görebilmek adına duyarlılık analizleri yapılmıştır. Bu amaçla, sunulan örnek problemin ana senaryo olarak kabul edilerek araç kapasiteleri, yakıt maliyetleri, elektrikli aracın kat edebileceği maksimum mesafe ve toplama ve dağıtım noktalarının yerleri/sıraları değiştirilerek farklı senaryolar oluşturularak incelenmiştir. Sürdürülebilirlik üzerine oluşturulan farklı senaryolarda yakıt maliyetleri ve emisyon salınım değerleri analiz edilip karşılaştırılarak, elektrik motorlu araçların kısa mesafe yük taşımacılığında kullanımının göz önünde bulundurulduğu dağıtım planları oluşturulmuştur. Yalnızca dizel motorlu araçların seyahat ettiği, bir elektrik ve bir dizel motorlu araç ile seyahat ettiği ve sadece elektrikli motora sahip araçların seyahat ettiğinin varsayıldığı farklı senaryolarda emisyon değerleri ve yakıt maliyetleri değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, senaryolardaki elektrikli araçların bakım ve satın alma maliyetleri göz ardı edilmiştir. Söz konusu senaryolar arasından hem en düşük maliyete sahip hem de karbon salınımı en düşük olanı dört adet elektrik motora sahip aracın kullanıldığı senaryo olmuştur. Bu noktada, kısa mesafe yük taşımacılığında elektrikli araçlar kullanılarak daha az maliyetli ve daha çevre dostu sonuçlar elde edilebileceği yorumunda bulunulabilir.

Sürdürülebilirlik üzerine kurulan senaryolar altında yapılan bir başka analiz de ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi üretiminin daha düşük maliyetli olup olmayacağını test edebilmek adına güneş paneli kurulum maliyeti üzerinden yapılan başa baş analizidir. Başa baş analizi sonucunda, güneş panellerine yapılacak bu potansiyel yatırımın geri dönüşünün yaklaşık 13 yıl süreceği görülmüştür. Söz konusu yatırım için getiri oranı ortalama %6 olarak hesaplanmış ve bu oranın oldukça düşük bir değerde olduğundan ötürü bu yatırımın finansal açıdan avantajlı olmadığı görülmüştür.

Çalışmanın kısıtları arasında, önerilen matematiksel modelin çok büyük problemlerde kullanıcılar için sahip olduğundan çok daha fazla hesaplama süresi ve hafıza gereksinimi yer alabilir. Bu noktada, bir sezgisel model geliştirilmesine ihtiyaç duyulabilir. Emisyon ve yakıt maliyeti karşılaştırılmasının daha geniş bir veri seti ile değerlendirilememiş oluşu ile güneş panelleri üzerinden elektrik üretimi için, gerçek bir verinin Türkiye koşullarında elde edilememiş oluşu da çalışmanın kısıtlarından sayılabilir. Bu çalışma ile ele alınan birebir toplama ve dağıtım problemi göz önünde bulundurulduğunda, ilerideki çalışmalarda, taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklanan emisyon salınımı ve enerji kullanım miktarlarını azaltabilmek adına zamana bağımlı araç hızları dikkate alınabilir. Ek olarak, elektrikli araç bataryalarının şarj edilebileceği noktaların dikkate alındığı, araçların daha uzun mesafeler kat edebilecekleri senaryolar üzerinde durulabilir. Bununla birlikte, matematiksel modellere yakıt tüketimlerine daha fazla odaklanılmasına olanak sağlayan yaklaşımlar dahil edilebilir.

### Yazar Katkıları / Author Contributions

*Muhammed Enes Taşdan:* Literatür taraması, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Veri Derleme, Analiz, Modelleme *Cem Menten:* Makale Yazımı-inceleme ve düzenleme *Mehmet Soysal:* Kavramsallaştırma, Metodoloji, Analiz, Modelleme *Mustafa Çimen:* Kavramsallaştırma, Metodoloji

*Muhammed Enes Taşdan:* Literatür review, Conceptualization, Methodology, Data Curation, Analysis, Modelling *Cem Menten:* Writing-review and editing *Mehmet Soysal:* Conceptualization, Methodology, Analysis, Modelling *Mustafa Çimen:* Conceptualization, Methodology

### Çatışma Beyanı / Conflict of Interest

Yazarlar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.  
*No potential conflict of interest was declared by the authors.*

### Fon Desteği / Funding

Bu çalışmada herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amacı gütmeyen organizasyondan fon desteği alınmamıştır.  
*Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.*

### **Etik Standartlara Uygunluk / Compliance with Ethical Standards**

Yazarlar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir.

*It was declared by the authors that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.*

### **Etik Beyanı / Ethical Statement**

Yazarlar tarafından bu çalışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan edilmiştir.

*It was declared by the authors that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.*



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.

*The authors own the copyright of their works published in Verimlilik Dergisi and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.*



## KAYNAKÇA

- Alke (2020a). "Electric Vehicles ATX320E"i <https://www.alke.com/electric-vehicles-atx320e>, (Erişim Tarihi:10.01.2020)
- Alke (2020b). "Technical Specs: ATX320E"i <https://www.alke.com/doc/technical-specs-alk-ATX320E.pdf>, (Erişim Tarihi:10.01.2020).
- Atasagun, G.C. ve Karaoğlan, İ. (2019). "Zaman Bağımlı Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi için bir Matematiksel Model", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 1743-1756.
- Ayadi, M., Chabchoub, H. ve Yassine, A. (2014). "An Exact Method for the Multi-Vehicle Static Demand Responsive Transport Problem Based on Service Quality: The Case of One-to-One", *International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, 2014, 308- 313.
- Aydoğdu, B. ve Özyörük, B. (2020). "Dinamik Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Probleminin Çözümü için Matematiksel Model ve Sezgisel Yaklaşım: Rassal İteratif Yerel Arama Değişken Komşu İniş Algoritması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(2), 563-580.
- Belgin, Ö., Karaoğlan, İ. ve Altıparmak, F. (2021). "İki Aşamalı Eş Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi için Matematiksel Programlama Tabanlı Sezgisel Yaklaşım", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(3), 1565-1580.
- Braekers, K., Ramaekers, K. ve Van Nieuwenhuysse, I. (2016). "The Vehicle Routing Problem: State of the Art Classification and Review", *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300-313.
- Castro, M.P., Cire, A. A. ve Beck, J.C. (2020). "An Mdd-Based Lagrangian Approach to the Multicommodity Pickupand-Delivery TSP", *INFORMS Journal on Computing*, 32(2), 263-278.
- Cherkesly, M. ve Gschwind, T. (2022). "The Pickup and Delivery Problem with Time Windows, Multiple Stacks, and Handling Operations", *European Journal of Operational Research*, 301(2), 647-666.
- Chopra, S. ve Meindl P. (2013). "Supply Chain Management Strategy, Planning and Operation", Prentice Hall, New Jersey.
- Cordeau, J.F., Laporte, G. ve Ropke, S. (2008). "Recent Models and Algorithms for One-to-One Pickup and Delivery Problems", *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, 327-357, Springer, Boston, MA.
- Dantzig, G.B. ve Ramser, J.H. (1959). "The Truck Dispatching Problem", *Management Science*, 6(1), 80-91.
- DEFRA (Department for Environmental Food and Rural Affairs) (2020). "European Union Emissions Trading Scheme", <http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/trading/eu/index.htm>, (Erişim Tarihi:10.01.2020).
- Demir, E. ve van Woensel, T. (2013). "Mathematical Modeling of CO2 Emissions in One-to-One Pickup and Delivery Problems", *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 63-67.
- Drexl, M. (2021). "On the One-to-One Pickup-and-Delivery Problem with Time Windows and Trailers", *Central European Journal of Operations Research*, 29(3), 1115-1162.
- Dumitrescu, I., Ropke, S., Cordeau, J.F. ve Laporte, G. (2010). "The Traveling Salesman Problem with Pickup and Delivery: Polyhedral Results and A Branch-and-Cut Algorithm", *Mathematical Programming*, 121(4), 269-305.
- EEA (European Environment Agency) (2016). "Data and Maps", <https://www.eea.europa.eu>, (Erişim Tarihi:10.01.2022)
- EIA (U.S.Energy Information Administration) (2020). "Electricity Explained: Data & Statistics", <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/data-and-statistics.php>, (Erişim Tarihi:10.01.2020).
- Factorovich, P., Méndez-Díaz, I. ve Zabala, P. (2020). "Pickup and Delivery Problem with Incompatibility Constraints", *Computers & Operations Research*, 113.
- Førsund, F. ve Hjalmarsson, L. (2004). "Calculating Scale Elasticity in DEA Models", *Journal of the Operational Research Society*, 55, 1023-1038.
- Franceschetti, A., Honhon, D., Van Woensel, T., Bektas, T. ve Laporte, G. (2013). "The Time Dependent Pollution Routing Problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, 56(C), 265-293.
- Ghiani, G., Laporte, G. ve Musmanno, R. (2004). "Planning and Managing Long-Haul Freight Transportation. Introduction to Logistics Systems Planning and Control", John Wiley & Sons, West Sussex, İngiltere.
- Graf, B. (2021). "Preemptive Stacker Crane Problem: Extending Tree-Based Properties and Construction Heuristics", *European Journal of Operational Research*, 292(2), 532-547.
- Guerriero, F., Pezzella, F., Pisacane, O. ve Trollini, L. (2014). "Multi Objective Optimization in Dial-a-Ride Public Transportation", *Transportation Research Procedia*, 3, 299-308.
- Haddad, M.N., Martinelli, R., Vidal, T., Ochi, L.S., Martins, S., Freitas Souza, M.J. ve Hartl, R. (2018). "Large Neighborhood-Base Metaheuristic and Branch-and-Price for the Pickup and Delivery Problem with Split Loads", *European Journal of Operational Research*, 270(3), 1014-1027.

- Iori, M. ve Riera-Ledesma, J. (2015). "Exact Algorithms for the Double Vehicle Routing Problem with Multiple Stacks", *Computers ve Operations Research*, 63, 83-101.
- Jabali, O., van Woensel, T. ve de Kok, A.G. (2012). "Analysis of Travel Times and CO2 Emissions in Time-Dependent Vehicle Routing", *Production and Operations Management* 21(6), 1060-1074.
- Keçeci, B., Altıparmak, F. ve İmdat, K. (2015). "Heterojen Eş-Zamanlı Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi : Matematiksel Modeller ve Sezgisel Bir Algoritma", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2), 185-195.
- Li, X. (2014). "Operations Management of Logistics and Supply Chain: Issues and Directions", *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014, 1-7.
- Liu, M., Zhang, C., Wu, Q. ve Meng, B. (2021). "Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows of Cargo Transport O2O Platforms", *International Journal of Simulation Modelling*, 20(2), 351-362.
- Mesa-Arango, R. ve Ukkusuri, S.V. (2013). "Benefits of in-Vehicle Consolidation in less than Truckload Freight Transportation Operations", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 60, 113-125.
- Montero, A., Miranda-Bront, J.J. ve Mendez-Diaz, I. (2017). "An ILP-Based Local Search Procedure for the VRP with Pickups and Deliveries", *Annals of Operations Research*, 259(14) 327-350.
- Naccache, S., Côté, J.F. ve Coelho, L.C. (2018). "The Multi-Pickup and Delivery Problem with Time Windows", *European Journal of Operational Research*, 269(1), 353-362.
- Nahmias, S. ve Olsen, T.L. (2015). "Production and Operations Analysis", Waveland Press, Illinois.
- OPET (2020). "Akaryakıt Fiyatları", <https://www.opet.com.tr/akaryakit-fiyatlari-arsivi>, (Erişim Tarihi: 14.02.2020).
- Öncan, T., Tüzün Aksu, D., Şahin, G. ve Şahin, M. (2011). "A Branch and Cut Algorithm for the Multi-Vehicle One-to-One Pickup and Delivery Problem with Split Loads", *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1864-1868.
- Park, H., Son, D., Koo, B. ve Jeong, B. (2021). "Waiting Strategy for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery Using Genetic Algorithm", *Expert Systems with Applications*, 165, 113959.
- Pelletier, S., Jabali, O. ve Laporte, G. (2014). "Goods Distribution with Electric Vehicles: Review and Research Perspectives", *CIRRELT-2014-44*, 1-36.
- Qi, X., Fu, Z., Xiong, J. ve Zha, W. (2020). "Multi-Start Heuristic Approaches for One-to-One Pickup and Delivery Problems with Shortest-Path Transport along Real-Life Paths", *PloS one*, 15(2), e0227702.
- Rushton, A., Croucher, P. ve Baker, P. (2010). "The Handbook of Logistics Distribution Management", Kogan Page Limited, Londra.
- Savelsbergh, M. ve Sol, M. (1995). "The General Pickup and Delivery Problem", *Transportation Science*, 29(1), 17-29.
- Sherif, S.U., Asokan, P., Sasikumar, P., Mathiyazhagan, K. ve Jerald, J. (2021). "Integrated Optimization of Transportation, Inventory, and Vehicle Routing with Simultaneous Pickup and Delivery in Two-Echelon Green Supply Chain Network", *Journal of Cleaner Production*, 287, 125434.
- SolarReviews. (2020a). "Is a 10kW Solar System Right for Your Home?", <https://www.solar-estimate.org/solar-panels101/10kw-solar-system>, (Erişim Tarihi:10.01.2020).
- SolarReviews. (2020b). "How Much does an Average 10kW Solar System Cost?", <https://www.solarreviews.com/blog/10kw-solar-systems-are-becoming-very-popular-here-is-why#how-much-does-a-10kw-solar-system-%20cost>, (Erişim Tarihi:10.01.2020).
- Soysal, M. ve Bloemhof-Ruwaard, J.M. (2017). "Toward Sustainable Logistics. Sustainable Logistics and Transportation: Optimization Models and Algorithms", Springer, Boston, MA.
- Soysal, M., Cimen, M. ve Demir, E. (2018). "On the Mathematical Modeling of Green One-to-One Pickup and Delivery Problem with Road Segmentation", *Journal of Cleaner Production*, 174, 1664-1678.
- Şahin, M., Çavuşlar, G., Öncan, T., Şahin, G. ve Tüzün Akus, D. (2013). "An Efficient Heuristic for the Multivehicle One-To-One Pickup and Delivery Problem with Split Loads", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 27, 169-188.
- Taefi, T.T., Kreuzfeldt, J., Held, T. ve Fink, T. (2017). "Supporting the Adoption of Electric Vehicles in Urban Road Freight Transport-A Multi-Criteria Analysis of Policy Measures in Germany", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 91(C), 61-79.
- The Pollution-Routing Problem Instance Library (2020). <http://www.apollo.management.soton.ac.uk/prplib.htm>, (Erişim Tarihi:10.01.2020).
- Toth, P. ve Vigo, D. (2002). "The Vehicle Routing Problem", Society for Industrial and Applied Mathematics.

- Treleven, K., Pavone, M. ve Frazzoli, E. (2013). "Asymptotically Optimal Algorithms for One-to-One Pickup and Delivery Problems with Applications to Transportation Systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 58(9), 2261-2276.
- US InflationCalculator (2020). "Current Inflation Rates", <https://www.usinflationcalculator.com/inflation/current-inflationrates>, (Erişim Tarihi:10.01.2020)
- Xiong, J., Qi, X., Fu, Z. ve Zha, W. (2020). "Split Demand One-to-One Pickup and Delivery Problems with the ShortestPath Transport along Real-Life Paths", *IEEE Access*, 8, 150539-150554.
- Yazgan, H.R. ve Büyükyılmaz, R.G. (2017). "Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemine Sezgisel bir Çözüm Yaklaşımı", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 436-449.
- Zhu, X., Garcia-Diaz, A., Jin, M. ve Zhang, Y. (2014). "Vehicle Fuel Consumption Minimization in Routing OverDimensioned and Overweight Trucks in Capacitated Transportation Networks", *Journal of Cleaner Production*, 85, 331-336.

## EKLER

**Tablo A1. Modelde kullanılan parametreler, parametrelerin değerleri, birimleri ve kaynakları**

<i>Sembol</i>	<i>Açıklama</i>	<i>Birim</i>	<i>Kaynak</i>
P	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7		
D	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7		
V	Depo, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, Yapay Depo	Adet	PRP Kütüphanesi <sup>1</sup>
A	189		
K	1 Dizel, 1 Elektrikli	Adet	Varsayım
$q_i$	Bakınız Tablo 3	Kg	PRP Kütüphanesi <sup>1</sup>
$Q_k$	Dizel: 3650, Elektrikli: 635	Kg	Teknik Özellikler <sup>5</sup>
$t_{ij}$	Bakınız Tablo A3	Dakika	Varsayım
$h_i$	Bakınız Tablo 4	Dakika	PRP Kütüphanesi <sup>1</sup>
M	Büyük bir sayı		Varsayım
$f_k$	Dizel: 1, Elektrikli: 0,025	TL/km	Teknik Özellikler <sup>2</sup>
$range_k$	Dizel: Sınır yok, Elektrikli: 400	Km	Teknik Özellikler <sup>2</sup>
$d_{ij}$	Bakınız Tablo A2	Metre	PRP Kütüphanesi <sup>1</sup>
$wage$	0,5	TL/dk	Varsayım

<sup>1</sup> PRP Kütüphanesi: (10.01.2020, <http://www.apollo.management.soton.ac.uk/prplib.htm>)

<sup>5</sup> Teknik özellikler: (10.01.2020, <https://www.alke.com/doc/technical-specs-alke-ATX320E.pdf>)

**Tablo A2. Düşümler arası mesafeler**

$d_{ij}$ (km)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	50,9	92,8	91,4	96,5	75,9	76,2	49,3	69,7	64,6	49,7	24,3	45	91,2	81,4	94,6
1	51,1	0	137,8	103,6	92,2	82,3	52,1	15,3	45,5	59,5	21,2	72,6	23,2	83,5	58	142,9
2	92,8	137,7	0	141	111,5	95	144,9	132,2	137,9	137,7	128,9	69,4	122,5	114,9	133,5	31,2
3	91	103,6	141,4	0	202,4	162,2	149,8	115,4	143,2	50,1	120,5	89,1	117	193,4	157,1	118,6
4	96,2	91,9	111,3	202,8	0	23,1	60	79,6	52,8	149,2	72,5	115,1	71,4	9,8	42,1	135
5	75,9	82,1	94,9	162,3	23,1	0	56,3	69,8	48,9	135,5	62,8	94,8	59,7	20,6	40,5	118,6
6	76,4	52,1	144,8	149,6	60,4	56,3	0	39,8	8	109,2	32,8	100	33,4	52,3	20,6	166,5
7	49,5	15,3	132,3	115,4	79,9	70	39,8	0	33,2	71,2	8,9	73,1	11	71,1	45,6	143,4
8	69,8	45,5	137,8	143	53,2	49	8	33,2	0	102,6	26,2	93,4	26,7	45	14,1	159,9
9	64,6	59,1	137,8	50,1	149,2	135,8	108,7	70,8	102,2	0	77,9	70	78,6	140,5	114,6	135,3
10	49,4	21,2	128,7	120	72,8	62,9	32,7	8,9	26,2	78,3	0	73,1	7,2	64,1	38,6	143,4
11	24,3	72,7	69,4	89,1	115,5	95	100,1	73,2	93,5	70	73,6	0	68,8	110,3	105,3	71,2
12	45,1	23,2	122,2	117	71,2	59,8	33,5	11	26,9	78,9	7,1	68,7	0	62,2	39,3	139
13	91,3	83,7	114,6	194	10,3	20,6	52,3	71,4	45,2	140,8	64,4	110,2	62,6	0	34,5	138,4
14	82	58	133,3	156,8	42,5	40,6	20,4	45,7	14,1	115	38,7	105,6	39,2	34,3	0	157
15	94,7	143,1	31	118,4	135,1	118,6	166,4	143,6	159,9	135,4	144	71,4	139,2	138,5	157,2	0

0: Depo, 1: P1, 2: P2, 3: P3, 4: P4, 5: P5, 6: P6, 7: P7, 8: D1, 9: D2, 10: D3, 11: D4, 12: D5, 13: D6, 14: D7, 15: Yapay Depo

**Tablo A3. D ğ mler arası seyahat s releri**

$t_{ij}$ (dk)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0,0	38,2	69,6	68,6	72,3	56,9	57,2	37,0	52,2	48,5	37,3	18,2	33,7	68,4	61,1	70,9
1	38,3	0,0	103,3	77,7	69,2	61,7	39,1	11,5	34,2	44,6	15,9	54,5	17,4	62,6	43,5	107,2
2	69,6	103,3	0,0	105,7	83,6	71,2	108,7	99,2	103,4	103,3	96,7	52,1	91,9	86,1	100,1	23,4
3	68,2	77,7	106,0	0,0	151,8	121,6	112,4	86,5	107,4	37,6	90,4	66,9	87,8	145,0	117,8	88,9
4	72,2	68,9	83,5	152,1	0,0	17,3	45,0	59,7	39,6	111,9	54,4	86,3	53,5	7,4	31,6	101,3
5	56,9	61,6	71,2	121,7	17,3	0,0	42,2	52,4	36,7	101,6	47,1	71,1	44,8	15,5	30,4	89,0
6	57,3	39,1	108,6	112,2	45,3	42,2	0,0	29,9	6,0	81,9	24,6	75,0	25,0	39,2	15,5	124,9
7	37,1	11,5	99,2	86,5	59,9	52,5	29,8	0,0	24,9	53,4	6,7	54,8	8,2	53,4	34,2	107,5
8	52,3	34,2	103,3	107,3	39,9	36,7	6,0	24,9	0,0	76,9	19,6	70,1	20,1	33,8	10,5	119,9
9	48,5	44,3	103,3	37,6	111,9	101,8	81,5	53,1	76,6	0,0	58,4	52,5	58,9	105,4	85,9	101,5
10	37,1	15,9	96,6	90,4	54,6	47,2	24,5	6,7	19,6	58,7	0,0	54,8	5,4	48,1	28,9	107,5
11	18,2	54,5	52,1	66,9	86,3	71,2	75,0	54,9	70,1	52,5	55,2	0,0	51,6	82,7	79,0	53,4
12	33,8	17,4	91,7	87,7	53,4	44,8	25,1	8,3	20,2	59,2	5,3	51,5	0,0	46,6	29,5	104,3
13	68,4	62,8	86,0	145,5	7,7	15,5	39,2	53,5	33,9	105,6	48,3	82,6	46,9	0,0	25,9	103,8
14	61,5	43,5	100,0	117,6	31,8	30,5	15,3	34,2	10,6	86,3	29,0	79,2	29,4	25,7	0,0	117,8
15	71,0	107,3	23,2	88,8	101,4	89,0	124,8	107,7	119,9	101,5	108,0	53,5	104,4	103,9	117,9	0,0

0: Depo, 1: P1, 2: P2, 3: P3, 4: P4, 5: P5, 6: P6, 7: P7, 8: D1, 9: D2, 10: D3, 11: D4, 12: D5, 13: D6, 14: D7, 15: Yapay Depo