



Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü  
İşletme Anabilim Dalı  
Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

**HETEROJEN ARAÇLAR İLE SÜRDÜRÜLEBİLİR BİREBİR  
TOPLAMA VE DAĞITIM PROBLEMİ ÜZERİNE BİR ANALİZ**

Muhammed Enes TAŞDAN

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2020



HETEROJEN ARAÇLAR İLE SÜRDÜRÜLEBİLİR BİREBİR TOPLAMA VE  
DAĞITIM PROBLEMİ ÜZERİNE BİR ANALİZ

Muhammed Enes TAŞDAN

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü  
İşletme Anabilim Dalı  
Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2020

## ÖZET

TAŞDAN, Muhammed Enes. *Heterojen Araçlar ile Sürdürülebilir Birebir Toplama ve Dağıtım Problemi Üzerine Bir Analiz*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2020.

Lojistik yönetimi sürecini etkin planlama, işletmeler için rakipleri arasında karşılaştırmalı üstünlük elde etmeyi sağlayan yollardan biri olarak kabul edilmektedir. Son yıllarda giderek önemi artan sürdürülebilir büyümenin sağlanması amacıyla, sürdürülebilir lojistik yönetimi çerçevesinde çevreye verilen zararı azaltan, çevre kirliliğinin önüne geçmeyi amaçlayan uygulamalar tercih edilmeye başlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, oluşturulan dağıtım planlarında alternatif enerji kaynaklarını kullanan elektrik motorlu araçların kullanıldığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında, araç rotalama problemlerinin bir türü olan bire bir toplama ve dağıtım problemi ele alınmıştır. Literatürde bire bir toplama ve dağıtım problemi üzerine yer alan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, dağıtım için kullanılacak araç filosunun dizel ve elektrikli araçlardan oluştuğu kabul edilmekte ve Karışık Tam Sayılı Programlama modeli kullanılarak farklı senaryolar üzerinde taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklanan yakıt tüketimi ve emisyon salınımı göstergeleri üzerinden değerlendirmeler yapılmaktadır. Çalışmanın bu yönüyle sürdürülebilir lojistik yönetimi konusuna katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Nümerik analizler sonucunda, kısa mesafe yük taşımacılığında elektrik motorlu araçların kullanımının hem maliyet hem taşımadan kaynaklı emisyon salınımı açısından faydaları ortaya konulmuştur. Ayrıca, elektrikli araçlar için ihtiyaç duyulan enerjiyi elde etmek için güneş panellerine yatırım yapıldığı ve buradan elektrik enerjisinin üretildiği bir durum üzerinden maliyet analizi yapılmıştır. Güneş panellerine yapılan bu yatırımın getiri oranı düşük olduğu için (ortalama %6), söz konusu yatırımın finansal olarak avantajlı olmadığı görülmektedir. Diğer yandan, elde edilecek olan çevresel fayda göz önünde bulundurulduğunda, yatırımın yük taşımacılığında sürdürülebilirliğe katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

### **Anahtar Sözcükler**

Sürdürülebilir lojistik, Kısa mesafe yük taşımacılığı, Birebir Toplama ve Dağıtım Problemi, Heterojen araçlar, Enerji tüketimi, CO<sub>2</sub> Emisyonu

## ABSTRACT

TAŞDAN, Muhammed Enes. *An Analysis on Sustainable One-to-One Pickup and Delivery Problem With Heterogeneous Vehicles*, Master's Thesis, Ankara, 2020.

Effective planning of the logistics management process is considered as one of the ways for businesses to achieve comparative advantage among their competitors. In order to achieve sustainable growth, which has become increasingly important in recent years, practices aiming to prevent environmental pollution and reducing environmental damage have started to be preferred within the framework of sustainable logistics management. For this purpose, it is observed that electric motor vehicles using alternative energy sources are used in the distribution plans. This thesis addresses one to one pickup and delivery problem, which is a type of vehicle routing problem. Unlike the studies on the problem of one to one pickup and delivery in the literature, in this thesis, it is assumed that the vehicle fleet to be used for distribution consists of diesel and electric vehicles, and evaluations are made on fuel consumption and emission indicators on different scenarios using the Mixed Integer Programming model. It is thought that this aspect of the study will contribute to sustainable logistics management literature. As a result of numerical analysis, the benefits of using electric motor vehicles in short-haul freight transportation are revealed in terms of both cost and emissions from transportation operations. Additionally, a cost analysis was carried out on a potential investment, which aims to build solar panels to produce the electric energy that is required by electric vehicles. Since this investment in solar panels has a low rate of return (average 6%), it is concluded that the investment in question is not financially viable. On the other hand, considering the environmental benefit to be obtained, the investment is thought to contribute to sustainability in freight transportation.

### Key Words

Sustainable logistics, short-haul freight transportation, One-to-One Pickup and Delivery Problem, Heterogeneous vehicles, Energy consumption, CO<sub>2</sub> Emissions

## İÇİNDEKİLER

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI.....	i
ETİK BEYAN .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
TABLOLAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
GİRİŞ.....	1
1. BÖLÜM: LOJİSTİK YÖNETİMİ .....	4
1.1. YÜK TAŞIMACILIĞI .....	5
1.2. SÜRDÜRÜLEBİLİR YÜK TAŞIMACILIĞI .....	7
1.3. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ .....	9
1.4. TOPLAMA VE DAĞITIM PROBLEMİ .....	11
1.4.1. Çoktan-Çoka (Many-to-Many) Toplama ve Dağıtım Problemi.....	12
1.4.2. Birden-Çoka-Çoktan-Bire (One-to-Many-to-One) Toplama ve Dağıtım Problemi .....	13
1.4.3. Bire-Bir (One-to-One) Toplama ve Dağıtım Problemi .....	14
2. BÖLÜM: LİTERATÜR TARAMASI.....	16
3. BÖLÜM: PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL.....	21
3.1. PROBLEM TANIMI .....	21
3.2. BİRE BİR TOPLAMA VE DAĞITIM PROBLEMİ İÇİN KARIŞIK TAM SAYILI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA MODELİ .....	22
4. BÖLÜM: NÜMERİK ANALİZLER.....	26
4.1. ÖRNEK PROBLEM VE ÇÖZÜMÜ .....	26
4.1.1. Örnek Problem ve Kullanılan Veri Setinin Tanıtılması .....	26
4.1.2. Örnek Problem Sonuçları .....	31
4.2. DUYARLILIK ANALİZLERİ .....	32
4.3. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNE SENARYO ANALİZİ.....	40
4.3.1. Farklı Senaryolar Üzerinden Yakıt Maliyeti ve Emisyon Karşılaştırılması .....	40
4.3.2. Güneş Panelleri İle Elektrik Üretimi Üzerinden Bir Maliyet Analizi	44

<b>SONUÇ .....</b>	<b>49</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>52</b>
<b>EK 1. TEZ KAPSAMININDA ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODELİN KODU .....</b>	<b>60</b>
<b>EK 2. GÜNEŞ PANELİ YATIRIMININ YILLIK ENFLASYON ORANI DAHİL EDİLEREK HESAPLANAN GETİRİLERİNİN GELECEK DEĞERLERİ .....</b>	<b>62</b>
<b>EK 3. GÜNEŞ PANELİ YATIRIMININ YILLIK ENFLASYON ORANI DAHİL EDİLEREK HESAPLANAN İNDİRGENMİŞ GETİRİ MİKTARLARI .....</b>	<b>64</b>
<b>EK 4. ORJİNALLİK RAPORU.....</b>	<b>66</b>
<b>EK 5. ETİK KURUL MUAFİYET FORMU.....</b>	<b>67</b>

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Bire bir toplama ve dağıtım problemi üzerine yapılan sayısal çalışmalarını özetleyen literatür tablosu

Tablo 2. Parametreler ve karar değişkenleri

Tablo 3. Modelde kullanılan parametreler, parametrelerin değerleri, birimleri ve kaynakları

Tablo 4. Toplama noktaları kümesi için yükler (kg)

Tablo 5. Tüm noktalar kümesindeki her nokta için hizmet süreleri (dk)

Tablo 6. Tüm noktalar (düğümler) arası mesafeler matrisi

Tablo 7. Tüm noktalar (düğümler) arası seyahat süreleri matrisi

Tablo 8. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) aracının rotası, taşıdığı yük miktarı, j noktasına varış zamanı ve seyahat ettiği yol

Tablo 9. 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

Tablo 10. Senaryolardaki araç tipi, sayıları ve kapasiteleri

Tablo 11. Toplam yakıt maliyeti, enerji kullanımı ve emisyon değerleri

Tablo 12. Güneş panellerinin iç verim oranları ve yıllık indirgenmiş getiri miktarları

Tablo 13. Güneş panellerinin farklı enflasyon oranları ile hesaplanmış iç verim oranları



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Çoktan-Çoka Toplama ve Dağıtım Problemi (Cordeau vd., 2008 (s. 327-357))

Şekil 2. Birden-Çoka-Çoktan-Bire Toplama ve Dağıtım Problemi (Cordeau vd., 2008 (s. 327-357))

Şekil 3. Bire-Bir Toplama ve Dağıtım Problemi (Cordeau vd., 2008 (s. 327-357))

Şekil 4. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Şekil 5. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Şekil 6. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Şekil 7. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Şekil 8. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Şekil 9. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Şekil 10. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Şekil 11. K1 (dizel) aracının izlediği rota

Şekil 12. K1 (dizel) ve K2 (dizel) araçlarının izledikleri rota

Şekil 13. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Şekil 14. K1, K2, K3, ve K4 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

## GİRİŞ

Lojistik yönetimi, mal ve hizmetlerin başlangıç ve varış noktaları arasında yönetimi ve idaresi olarak tanımlanmaktadır (Li, 2014). Lojistik yönetim sürecini etkin bir şekilde günün ihtiyaçlarına göre planlayabilmek firmalara bu alanda rekabet avantajı sağlamaktadır (Chopra ve Meindl, 2013 (s. 500-509)). Lojistik planlama ve yönetimi başlığı altında yer alan nakliye ve yük taşımacılığı uygulamaları tedarik zincirinin önemli bir parçası olarak karşımıza çıkmaktadır. Tarihsel olarak bakıldığında, tekerleğin icadı ile başladığını varsayabileceğimiz yük taşımacılığının, günümüzde hava, kara, deniz gibi farklı ulaşım yolları üzerinde farklı ulaşım araçlarıyla yapıldığı görülmektedir.

21. yüzyılda akademik literatürde gittikçe artan bir önem kazanan sürdürülebilirlik konusu lojistik ve yük taşımacılığı alanında çalışılmaya başlanmıştır (Franceschetti vd., 2013). Yük taşımacılığı alanında çevreye verilen zararı azaltan ve çevre kirliliğinin önüne geçmeyi amaçlayan sürdürülebilir uygulamalar ilgi çekici hale gelmiştir (bknz. Demir ve Van Woensel, 2013; Soysal vd., 2018). Nakliyecilik işlemlerinde kullanılan araçların doğaya salmış oldukları emisyon değerlerinin azaltılması, dizel yakıtların kükürt içeriğinin azaltılması, yüksek basınçlı yakıt enjeksiyon sistemlerinin kullanımı, bilgisayarlı motor yönetim sistemlerinin kullanımı ve alternatif enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi bu uygulamalara örnek olarak verilebilir (Rushton vd., 2010 (s. 585-604)).

Sürdürülebilir yük taşımacılığı alanında, taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklanan emisyon salınım değerlerinin minimize edildiği araç rotalama problemleri (Vehicle Routing Problems) çalışılmaya başlandığı görülmektedir (bknz. Jabali vd., 2012; Demir ve Van Woensel, 2013; Franceschetti vd., 2013; Pelletier vd., 2014; Taefi vd., 2017; Soysal vd., 2018). Söz konusu rotalama problemlerinde, taşımacılık faaliyetleri için kullanılan araçların yakıt olarak elektrik enerjisi kullanımı göze çarpmaktadır. Doğal ve yenilenebilir (güneş, rüzgar, dalga, jeotermal, hidrolik ve biyokütle) kaynaklar ile üretilen elektrik enerjisinin kullanımı bu alanda sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Maliyetin ve/veya emisyon salınım miktarının minimize edildiği araç rotalama problemlerinde elektrik motorlu araçlar kullanımı ile sürdürülebilir bir lojistik planı oluşturulmaktadır.

1960'lı yıllarda matematiksel modelleme ve optimizasyon tekniklerindeki ilerlemeler ile paralel olarak, yük taşımacılığı alanında karşılaşılan operasyonel problemlerden biri

olan araç rotalama problemleri de modellenmeye ve çözülmeye başlanmıştır. Daha önceden belirlenen bir amaç doğrultusunda (maliyet, emisyon salınım minimizasyonu, kar maksimizasyonu, vb.) ve bir kısıt seti (talep kısıtları, kapasite kısıtları, zaman kısıtları, vb.) altında optimal dağıtım planının oluşturulduğu araç rotalama problemleri akademik literatürün sürekli gelişen bir parçası olmuştur.

Bu tez çalışmasının da konusu olan toplama ve dağıtım problemi (Pickup and Delivery Problem), araç rotalama probleminin bir türü olarak ele alınmaktadır (Savelsbergh ve Sol, 1995). Mal/hizmet arz eden toplama noktaları ve mal/hizmet talep eden dağıtım noktalarından oluşan bu problem tipinde herhangi bir aktarma noktası bulunmamaktadır. Dağıtım faaliyetleri için kullanılan araçlar seyahate merkezi bir depodan başlamakta ve seyahatlerini yine depoda bitirmektedir. Araçlar belirlenen dağıtım planı doğrultusunda, bir başlangıç noktasından (toplama noktası) aldığı yükü, bir varış noktasına (dağıtım noktası) bırakmak durumundadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, toplama ve dağıtım problemi türlerinden biri olan bire bir toplama ve dağıtım probleminde heterojen araçların (dizel ve elektrik motorlu) kullanıldığı farklı senaryoların incelenmesidir. Bahsedilen senaryolar üzerinde, taşımacılık faaliyetleri sonucu ortaya çıkan dağıtım maliyeti ve CO<sub>2</sub> emisyon miktarı göstergeleri üzerinden değerlendirmeler yapılmaktadır. Buna ek olarak, dağıtım faaliyetlerinde kullanılan elektrik motorlu araçlar için ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin güneş panelleri kurularak üretilmesi durumunu ele alan bir senaryo üzerinde durulmaktadır.

Çalışmanın birinci bölümünde, genel olarak lojistik ve yük taşımacılığı üzerinde durulmaktadır. Yük taşımacılığı tipleri ve uygulamaları anlatılıp sürdürülebilir yük taşımacılığına değinilmektedir. Daha sonra ise, yük taşımacılığı literatüründe yer alan araç rotalama problemi ve bu tezin konusu olan toplama ve dağıtım problemi detaylı olarak ele alınmaktadır.

İkinci bölümde toplama ve dağıtım probleminin yer aldığı çalışmaların incelendiği literatür taraması yer almaktadır. Bu bölümde, bu kapsamda bulunan çalışmalar model tipleri, amaç fonksiyonları, araç tipleri ve sürdürülebilirliğe katkıları yönleriyle ele alınıp sınıflandırılmaktadır.

Üçüncü bölümde tez kapsamında oluşturulan bire bire toplama ve dağıtım probleminin tanımı yapılmakta ve çözümü için önerilen matematiksel model yer almaktadır. Bu bölümde, oluşturulan problemin parametreleri ve karar değişkenleri tanıtılmakta ve

amaç fonksiyonu ve kısıtlarla birlikte çözüm için önerilen matematiksel model açıklanmaktadır.

Dördüncü bölümde tez çalışması kapsamında yapılan nümerik analizler paylaşılmaktadır. Problem tanımı ve matematiksel model başlığı altında anlatılan problem ve önerilen matematiksel model kullanılarak oluşturulmuş bir örnek problem analizi, örnek problemin parametreleri üzerinde değişiklik yapılarak oluşturulan yeni senaryoların duyarlılık analizleri ve kullanılan yakıt ve araç tipleri değiştirilerek oluşturulan yeni senaryolar üzerinden yapılan sürdürülebilirlik senaryo analizi olmak üzere üç adet temel başlık altında yapılan analizler yer almaktadır.

Sonuç bölümünde ise tez çalışması ve nümerik analizlerin sonuçlarıyla ilgili genel değerlendirmeler ve yorumlar yer almaktadır.

## 1. BÖLÜM: LOJİSTİK YÖNETİMİ

Lojistik, mal ve hizmetlerin müşterilerin talep ve ihtiyaçlarını karşılama amacıyla bir başlangıç noktasından, tüketicimin gerçekleştiği bitiş noktasına ulaştırılması olarak tanımlanmaktadır (Li, 2014). Lojistik; malzeme idaresi, paketleme, taşıma, depolama gibi faaliyetlerin tamamını kapsamaktadır. Genel olarak bakıldığında, lojistik faaliyetlerinin amacı, doğru ürünleri, doğru zamanda, doğru yere ulaştırmaktır. Bunu yaparken de belirlenmiş performans kriterlerinin (minimum maliyet, minimum emisyon salınımı, maksimum kar, vb.) belirli bir kısıt seti altında (talebin karşılanması, araç kapasitesinin aşılmaması, zaman pencerelerinin dikkate alınması, vb.) en iyi düzeye gelmesini sağlamaktır (Ghiani vd., 2004 (s. 199-245)).

Lojistik planlama özünde ekonomik bir fayda sağlama amacıyla hem özel şirketlerin karlılığı açısından hem de ülkelerin uluslararası ticaret faaliyetlerindeki rolü açısından oldukça önemlidir. Günümüzde küresel bir seviyede gerçekleşen üretim, ticaret gibi faaliyetler, sadece ekonomik amaçlar ve faydadan ziyade, çevresel ve sosyal bileşenlerin de lojistik planlama sürecine dahil edilmesini zorunlu kılmaktadır.

Lojistik faaliyetlerde bulunan işletmelerin, bu faaliyetlerin insan sağlığı üzerinde bıraktığı çevresel etkilerden de sorumlu olacak şekilde daha bilinçli hareket etmesini zorunlu hale getirmiştir. Üretim ve dağıtım faaliyetlerinde çevreye verilen zararın azaltılması, işletmenin marka imajının iyileştirilmesine, böylelikle de karlılığının artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu yüzden lojistik faaliyetler de çevreye ve insan sağlığına duyarlı hale gelmiş ve sürdürülebilir lojistik günümüzde çalışılan alanlardan biri olarak literatürde yer almaya başlamıştır. Sürdürülebilir lojistik kavramı, hem gerçek hayatta hem de akademik literatürde ilgi çeken konulardan birisi haline gelmiştir (bkz. Demir ve Van Woensel, 2013; Soysal vd., 2018; Zhu vd., 2014).

Sürdürülebilir lojistik, ekonomik kaygıların yanında, çevresel (sera gazları, hava kirliliği, gürültü kirliliği, enerji kullanımı/enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kullanımı, arazi kullanımı ve paketleme veya nakliye faaliyetlerinde atık yönetimi, vb.) ve sosyal (toplu taşıma, toplu taşımada ulaşılabilirlik, istihdam seviyesi ve koşulları, sağlık ve güvenlik ile ilgili olaylar, vb.) sorunlarla da ilgilenmektedir. Lojistik yönetimi literatüründe, lojistik operasyonlarının sürdürülebilirlik performansının ölçümünde enerji kullanımı ve emisyon salınım miktarı temel performans göstergeleri (KPIs) olarak değerlendirilmektedir (Soysal vd., 2018).

İşletmeler rekabet avantajı sağlaması amacıyla lojistik faaliyetlerinde farklı stratejiler izlemektedir. Bu stretejiler yıllar boyunca o günün talep ve ihtiyaçlarına göre şekillenmiştir. Son yıllarda birçok alanda önem kazanmaya başlayan çevreci yaklaşımlar lojistik alanında da karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple işletmeler tarafından yerel ve uluslararası alanda rekabet avantajı sağlamak ve marka imajını iyileştirmek amacıyla tedarik zincirinin her alanında olumsuz çıktıları azaltmayı amaçlayan uygulamalar üzerinde çalışılmaya başlanmıştır (Bloemhof ve Soysal., 2017 (s. 395-412), Soysal ve Bloemhof, 2017 (s. 1-17), Soysal vd., 2019).

Günümüzde sürdürülebilir lojistik/yeşil lojistik kavramlarına uygun emisyon azaltıcı uygulamalar, sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin dizaynı gibi amaçlar hem hükümetler hem de özel şirketler tarafından benimsenmektedir (Demir ve Van Woensel, 2013). Bu uygulamalar tedarik zincirinin tamamında farklı şekillerde karşımıza çıkmaktadır. Örneğin, ana ürünün imalatında kullanılan ham madde ve yan ürünlerin temininde geri dönüştürülebilir parçalar ve bunu sağlayan tedarikçiler tercih edilmeye başlanmıştır. Ürün hazır hale gelip, müşteriye ulaştırılacağı zaman da yine sürdürülebilir uygulamalar ile optimal dağıtım planları belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu doğrultuda, çevre kirliliğini azaltmaya yönelik araç rotalama problemleri modellenmeye ve çözülmeye başlanmıştır. Dağıtım faaliyetleri için elektrikli araçların kullanımı ve/veya araçların emisyon değerlerini azaltmak amacıyla trafiğin durumuna göre belirlenen seyahat zamanları bu amaca örnek uygulamalardan birkaçı olarak belirtilmektedir (Guo ve Liu, 2017).

## 1.1. YÜK TAŞIMACILIĞI

Lojistik faaliyetleri içinde yük taşımacılığı, tedarik zincirinde geliştirilmeye açık alanlardan birisidir. Ham maddeyi kaynağından tesislere, yarı mamül fabrikalara ve son ürünü müşterilere veya perakendecilere taşımak titizlikle gerçekleştirilmesi gereken bir işlemdir. Bu bağlamda yük taşımacılığı maliyeti ve karlılığı direkt olarak etkilemektedir. Birçok endüstri için taşımacılık maliyetleri lojistik maliyetleri içinde büyük bir kısmı oluşturmaktadır. Bu yüzden, yük taşımacılığı ile bağlantılı her uygulamanın lojistik planlama sürecine dahil edildiği, uzun vadeli planlar yapmanın stratejik açıdan faydalı olacağı düşünülmektedir (Ghiani vd., 2004 (s. 199-245)).

Yük taşımacılığı katedilen mesafeye göre uzun mesafe yük taşımacılığı ve kısa mesafe yük taşımacılığı olarak ikiye ayrılabilir (Ghiani vd., 2004 (s. 199-245)). Uzun mesafe

yük taşımacılığında mallar tesisler arası, fabrika ve depo arası gibi uzun mesafeler arasında taşınmaktadır. Söz konusu bu malların taşınmasında hava yolu, kara yolu, demir yolu veya deniz yolunun kullanıldığı görülmektedir. Bütün taşımacılık yollarının kullanılabilirdiği, genelde daha uzun mesafeler arası miktar olarak daha ağır ve fazla malın taşındığı uzun mesafe yük taşımacılığında buna bağlı olarak daha geniş ölçekli taşımacılık planları oluşturulmaktadır.

Kısa mesafe yük taşımacılığı göreceli olarak daha küçük bölgelerde genelde bir depodan başlayarak belirli toplama ve dağıtım noktaları üzerinde araç veya araçlarla yapılmaktadır. İşletmeler ürünlerin mağazaya/perakendeciye veya direkt olarak müşteriye nakliyesi için belirlenen amaç doğrultusunda bir taşımacılık planı oluşturmaktadır. Kısa mesafe yük taşımacılığına konu olan problemler çöp toplama, posta teslimi, cihaz tamir hizmetleri, yaşlı ve engelliler için taşımacılık hizmetleri ve acil servis hizmetleri (ambulans, itfaiye) gibi alanlarda karşılaşılmaktadır (Ghiani vd., 2004 (s. 247-298)).

Taşımacılık faaliyetlerinde maliyet, kullanılan araç filosunun maliyeti, araçları kullanan ekibin maaşları, yakıt tüketimi, araç amortismanı, aracın bakım giderleri, aracın ve ekibin sigorta giderleri ve yönetsel giderler olarak sınıflandırılmaktadır (Ghiani vd., 2004 (s. 247-298)). Maaşlar ve sigortalar zamana bağımlı; yakıt tüketim, araç bakımı gibi giderler ise mesafeye bağımlı; araç amortismanı ise hem mesafeye hem de zamana bağımlı giderler olarak görülmektedir (Ghiani vd., 2004 (s. 247-298)).

2000'li yılların başına kadar, yük taşımacılığı faaliyetlerinde genel olarak amacın maliyet minimizasyonu olduğu görülmektedir (Crainic, 2000; Forkenbrock, 1999; Forkenbrock, 2001). Son yıllarda çevreye verilen zararı azaltmaya yönelik atılan adımların etkisiyle, lojistik firmaları maliyetin yanında olumsuz çıktıların (trafik, ses, emisyon salınım miktarı, vb.) minimizasyonuna da önem vermeye başlamışlardır (Jabali vd., 2012, Demir ve Van Woensel, 2013).

Günümüzde ortaya çıkan ekonomik, sosyal ve çevresel sorunlar kısa mesafe yük taşımacılığı alanında da yeni gelişmelerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu gelişmeler kimi zaman yeni müşteriler yaratmış, kimi zaman da var olan müşterilerin taleplerinde farklılaşmalara neden olmuştur. Ekonomik açıdan daha az maliyetli alternatifler, sosyal açıdan daha ulaşılabilir ağlar ve aktörler, çevresel açıdan ise sürdürülebilir, çevreye duyarlı yöntemler tercih edilmeye başlanmıştır. Örneğin son yıllarda elektronik ticaretin daha büyük kitleler tarafından kullanılmaya başlanması ile

birlikte hem işletmeden işletmeye (B2B) hem de işletmeden tüketiciye (B2C) yapılan teslimat sayılarında artış olmuştur. Talepteki artışı karşılamak için işletmeler, bahsedilen ekonomik, sosyal ve çevresel sorunları da göz önünde bulundurarak daha kısa teslimat süreleri içerisinde hizmet vererek müşteri memnuniyetini artırma yoluna gitmektedirler.

Yukarıda bahsedilen ekonomik, sosyal ve çevresel sorunları çözmek amacıyla ortaya konulan gelişmeler ışığında müşteri taleplerini ve beklentilerini karşılamak amacıyla taşımacılık şirketleri hem daha az maliyetli hem de çevreye verilen zararı azaltan yöntemler, uygulamalar bulmak zorundadır.

## 1.2. SÜRDÜRÜLEBİLİR YÜK TAŞIMACILIĞI

Birleşmiş Milletler sürdürülebilir gelişmeyi “gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılayabilme yetisinden ödün vermeden günümüzün ihtiyaçlarını karşılayan bir gelişme” olarak tanımlamaktadır (Brundtland Raporu, 1987). Sürdürülebilir gelişme kavramı tedarik zincirinde yer alan tüm alanlara uygulanabilmektedir ve bir tedarik zincirinin sürdürülebilirlik performansı enerji tüketimi, su tüketimi, sera gazı emisyonları ve atık üretimi göstergeleri üzerinden ölçülebilmektedir (Chopra ve Meindl, 2013 (s. 500-509)). Bu bilgiler dikkate alındığında, yük taşımacılığı alanında enerji tüketimi ve emisyon salınımı göstergelerinin performanslarını iyileştirilerek sürdürülebilir gelişmeye katkı sağlanması mümkündür.

Sera gazı emisyonları ile ilgili olarak, kara yolları üzerinde seyahat eden araçların yakıt tüketimi sonucu ortaya çıkan zararlı emisyon salınım miktarları hükümetler, basın, çevreci gruplar ve diğer ilgili kuruluşların dikkatini çekmektedir. Büyük araç filoları kullanarak hizmet veren işletmeler için “1 litre dizel yakıt 3 kilogram CO<sub>2</sub> ortaya çıkarmakta” gibi dönüşüm oranları emisyon salınımı performans ölçümü konusunda faydalı olabilir (Rushton vd., 2010 (s. 585-604)).

2007 yılında Avrupa Birliği trafik sıkışıklığı, çevre ve gürültü kirliliği, CO<sub>2</sub> emisyon salınımı ve fosil yakıtlara bağımlılık sorunlarına işaret ederek yük taşımacılığı ve lojistik endüstrisi için uzun vadede verimliliği ve büyümeyi artıracak bir eylem planı hazırlamıştır. Bu eylem planında anahtar noktalar: (1) bilginin ve iletişimin elektronik ortam üzerinden yapılması ve kağıt kullanımının önüne geçilmesi, (2) operasyonel ve yapısal alanlarda darboğazı önlemek adına kalite ve verimlilik uygulamaları, (3) ulaşım faaliyetlerinde yönetimsel gereklilikleri ve prosedürleri azaltarak ulaşım zincirlerinin



basitleştirilmesi ve bunun sonucu azalan maliyetler, (4) araçların aerodinamiğini ve enerji verimliliğini geliştirmek adına araç boyutları ve yükleme standartlarında değişiklikler yapılması, (5) yeşil ulaşım koridorları oluşturarak verimliliği artırmak ve taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklı çevreye verilen zararın azaltılması, ve (6) yük taşımacılığında uğrak nokta olan Avrupa kentlerinde lojistiğin bilgi ve iletişim teknolojilerini kullanarak şehir planlama sürecine entegre hale getirilmesi şeklinde özetlenmektedir<sup>1</sup>.

Günümüzde yük taşımacılığında alternatif enerji kaynaklarının kullanımı ile çevreye verilen zararı azaltan, sürdürülebilir senaryolar oluşturulmaktadır (Talebian vd., 2018, Soysal vd., 2020). Sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), biyodizel ve elektrik enerjisi kullanılan alternatif yakıtlara örnek olarak verilebilir (Rushton vd., 2010 (s. 585-604)). Son yıllarda elektrik enerjisini üretme ve depolamada ortaya çıkan teknolojik gelişmeler, elektrik enerjisinin daha uzun süre kullanımına olanak sağlayan bataryaların üretilmesinin yolunu açmış; bu da elektrik motorlu araçların yük taşımacılığı alanında kullanımına etki etmiştir (Taefi vd., 2017). İçten yanmalı motor ile çalışan bir araca kıyasla bataryalı elektrikli bir aracın avantajları motor çalışırken hava kirliliğine neden olan sera gazlarının ve çeşitli parçacıkların ortaya çıkmaması ve gürültü kirliliğinin daha az olmasıdır (Bektas vd., 2018).

Öte yandan, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla elektrik motorlu araçların yatırım maliyeti, seyahat edebileceği kilometrenin kısa olması ve uzun şarj süresi, yük taşımacılığında elektrikli araçların kullanımını kısıtlamaktadır (Bektas vd., 2018). Yük taşımacılığı alanında elektrikli araçların tercih edildiği durumlarda, aracın dizel motorlu araçlara kıyasla düşük yakıt giderlerinin yanında yüksek satın alma maliyeti aracın kullanım ömrü boyunca avantaj sağlayıp sağlamayacağı tartışılmaktadır (Davis ve Figliozzi, 2013). Geleneksel enerji kaynaklarının maliyeti yükselirken, düşen elektrik maliyetiyle birlikte elektrik motorlu araçların daha fazla tercih edileceği öngörülmektedir (Davis ve Figliozzi, 2013).

Zamanı etkin kullanmak adına taşımacılıkta kullanılan elektrik motorlu araçların bataryaları genelde gecedan veya sürücünün yemek molası gibi uzun süren molalar verdiği zamanlar şarj edilmektedir (Pelletier vd., 2014). Yük taşımacılığında şu anda kullanımda olan elektrikli araçlardaki lityum iyon bataryaların ömrü ortalama 1000 –

---

<sup>1</sup> Yük Taşımacılığı Lojistik Eylem Planı, 2007 – Erişim tarihi: 25.04.2020, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM%3Atr0053>

2000 derin döngü olarak ifade edilmektedir. Bu da ortalama 6 yıllık bir batarya ömrüne denk gelmektedir. Önümüzdeki yıllar içinde ise, yük taşımacılığında kullanılan elektrikli araçların 4000 – 5000 derin döngülük bir batarya ömrüne sahip olması beklenmektedir (Pelletier vd., 2014).

Elektrik motorlu araçların işletme maliyeti, dizel araçlara kıyasla yaklaşık 4 kat daha az olmasına karşın, bu araçların satın alma maliyeti neredeyse 3 kat daha fazladır (Feng ve Figliozzi, 2013). Bakım maliyeti ise, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla %20 - %30 oranında daha az olduğu ve bu avantajın içten yanmalı motorlu araçların yaşlanması ile daha da artacağı öngörülmektedir. Elektrik maliyetinin de dizele kıyasla daha düşük olması elektrik araçları uzun vadeli planlar ve yatırım yaparken daha çekici hale getirmektedir (Pelletier vd., 2014).

### **1.3. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ**

İlk olarak 1959 yılında Dantzig ve Ramser tarafından ele alınan araç rotalama problemi, yük taşımacılığı ve lojistik alanında oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Araç rotalama problemi, bir veya birden fazla depodan, coğrafi olarak dağılmış şehirlere veya müşterilere ana ve bazı yan kısıtlara tabi olarak optimal teslimat veya toplama rotasının tasarım problemi olarak tanımlanabilir (Laporte, 1992).

Literatürde amaçları ve yan kısıtları farklı olan birçok araç rotalama problemi türü bulunmaktadır. Gezgin satıcı problemi (TSP) (bkz: Laporte, 1992), Çoklu gezgin satıcı problemi (mTSP) (bkz: Bektas, 2006), Kapasiteli araç rotalama problemi (CVRP) (bkz: Cordeau vd., 2000), Zaman pencereci araç rotalama problemi (VRPTW) (bkz: Cordeau vd., 2002), Toplama ve dağıtım noktalı araç rotalama problemi (VRPPD) (bkz: Desaulniers, 2002) kısıtlarına göre farklı isimler alan başlıca araç rotalama problemleridir.

Bir önceki başlık altında bahsedilen sürdürülebilirlik kavramının lojistik ağlarının tasarımı üzerindeki etkisi düşünüldüğünde, araç rotalama problemleri de söz konusu gelişmelerden etkilenmiştir. Alternatif enerji kaynaklarını kullanan araçlar ile dağıtım faaliyetlerinden kaynaklanan emisyon salınımını azaltmayı amaçlayan araç rotalama problemleri de son yıllarda literatürde yer almaktadır (Bektas vd., 2016, Pelletier vd., 2018). Bu problemler, yeşil araç rotalama problemleri altında ele alınmaktadır (Guo ve Liu, 2017).

Klasik araç rotalama probleminde amaç genelde müşterilerin ihtiyaçlarını karşılarken maliyetini minimize edecek olan dağıtım planının belirlenmesidir. Temel kısıtlar;

- Her nokta bir kere ziyaret edilmelidir.
- Araç seyahatine depodan başlayıp, depoda bitirmelidir.
- Oluşturulan dağıtım planındaki toplam talep aracın kapasitesini aşmamalıdır (Soysal vd., 2018).

Yukarıda bahsedilen temel kısıtlara ek olarak sıklıkla kullanılan yan kısıtlar ise;

- Toplam zaman kısıtları; rotanın uzunluğu daha önce belirlenmiş üst sınırı geçmemelidir. Bu uzunluk rota üzerindeki her nokta için, noktalar arası seyahat süresine ve bekleme süresine bakılarak oluşturulur. Zaman veya mesafe kısıtlamalı araç rotalama problemi literatürde zaman veya mesafe kısıtlı araç rotalama problemi olarak da geçmektedir (Laporte, 1992).
- Zaman pencereleri; her bir noktaya daha önce belirlenen zaman aralığında varılmalıdır.
- Nokta/şehir çiftleri arasındaki öncelik ilişkisine dayalı kısıtlar;  $i$  noktası  $j$  noktasından önce ziyaret edilmelidir (Laporte, 1992).

Araç rotalama problemlerinde, problem ile ilgili müşteri talebi, ürünün hangi zaman aralıklarında teslim edilmesi gerektiği gibi veriler daha önceden biliniyorsa statik bir yapı söz konusudur. Diğer taraftan, bunun zıttı olan durumda, yani problemle ilgili veri belirsiz ve dinamik bir yapıdayken, buna uygun plan araç rota üzerindeyken oluşturulmaktadır (Ghiani vd., 2004 (s. 199-245)). Bu problem, literatürde dinamik araç rotalama problemi olarak bilinmektedir (Gendreau ve Potvin, 1998 (s. 115-126)).

Yük taşımacılığı alanında oluşturulan birçok problemde zaman pencerelerinin kullanımı göze çarpmaktadır. Müşteri talebini karşılamak adına optimal rota oluşturulurken uygun zaman kısıtları da modellerde yer almıştır. Müşteriler belirlenen teslimat saatleri ile talebinin karşılanması gereken zaman aralığını söylemektedir.

Bazı araç rotalama problemleri zamana bağımlı hızı dikkate almaktadır. Zamana bağımlı hız, seyahat edilen zamana bağlı olarak seyahat süresinin dolayısıyla araç hızının değişmesini ifade etmektedir. Araç hızının gün içinde yolun ve trafiğin durumuna göre değişiminin dikkate alınması, gerçek hayata daha uygun bir model oluşturmaya olanak sağlamaktadır. Günün belirli zamanlarında, örneğin sabahın erken

saatleri, işlek yollarda trafiğin oluşması kaçınılmazdır. Trafiğin oluştuğu zamanlarda, araç daha önce belirlenen hız profillerinden uygun olan değerle hareket etmekte ve seyahat süresi de ona göre oluşmaktadır. Trafiğin bittiği zamanda ise, serbest hız profiliyle seyahat etmektedir (Franceschetti vd., 2013).

Zaman kısıtlarından sonra bir diğer önemli kısıt grubu ise, kapasite kısıtlamalarıdır. Problemin çözümünde kullanılan her aracın belirli bir kapasitesi olduğu ve bu kapasiteden fazla ürün taşıyamayacağı, bu aracın yolculuğuna belirli bir başlangıç noktasından başladığına ve belirli bir bitiş noktasında bitirdiğine dikkat edilmelidir. Bahsedilen başlangıç ve bitiş noktaları ise aynı noktalar olmak zorunda değildir.

Direkt ağaç arama yöntemleri (direct tree search methods), dinamik programlama ve tamsayılı doğrusal programlama yöntemleri araç rotalama problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Laporte, 1992). Literatüre bakıldığında, bu algoritmaların yanında çeşitli sezgisellerin de kullanıldığı görülmektedir. Sıklıkla kullanılan bu sezgisel algoritmalara örnek olarak dal ve kesme (branch and cut), dal ve sınır (branch and bound) verilebilir.

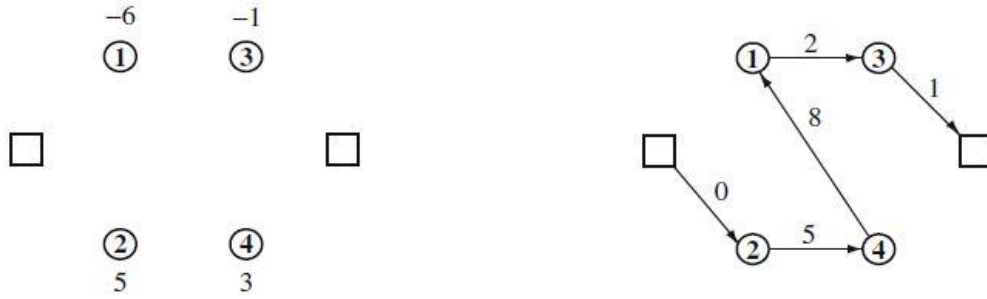
#### **1.4. TOPLAMA VE DAĞITIM PROBLEMİ**

Araç rotalama problemi türlerinden biri olan toplama ve dağıtım problemi, nesnelere veya insanların bir başlangıç noktasından varış noktasına taşınması olarak tanımlanmaktadır (Berbeglia vd., 2007). Toplama ve dağıtım problemi ile günlük hayatta, ürünlerin (et, süt, sebze ve çabuk bozulmayan konserve gıdalar, vb.) merkezi bir depodan süpermarket ve hipermarketlere dağıtımında karşılaşılmaktadır (Factorovich vd., 2020). Literatürde bunun yanında, cam atık toplama, mandıradan süt toplama, benzin toplama gibi kendine özgü problemler de toplama dağıtım problemi altında modellenmektedir (Henke vd., 2019; Caramia ve Guerriero, 2010, Lahyani vd., 2015).

Bu problem tipinde, malı/hizmeti arz eden toplama noktaları ve malı/hizmeti talep eden dağıtım noktaları bir veya birden daha fazla araç ile ziyaret edilerek bir dağıtım planı oluşturulmaktadır. İlgili literatüre baktığımızda, bu alanda oluşturulan problemlerin genelinde amacın bir araç filosu için toplama ve dağıtım noktalarından uygun sırayla geçen optimal dağıtım planları oluşturularak taşımacılık maliyetini minimize etmek olduğu görülmektedir (Soysal vd., 2018). Başlangıç ve varış noktalarının sayısına göre toplama ve dağıtım problemi üçe ayrılmaktadır (Berbeglia vd., 2007).

### 1.4.1. Çoktan-Çoka (Many-to-Many) Toplama ve Dağıtım Problemi

Bu tip problemlerde taşınan her ürün için her nokta başlangıç veya varış noktası olarak seçilebilmektedir (Ayadi vd., 2014). Şekil 1’de pozitif sayılı noktalar  $x$  birim ürün arz etmekte, negatif noktalar ise  $y$  birim ürün talep etmektedir. Yaylar üzerinde sayılar ise, araç yükünü göstermektedir. Bu örnekte, depodan seyahatine başlayan araç ilk olarak 2 numaralı noktaya gidip 5 birim yük almıştır, sonra 4 numaralı noktaya gidip 3 birim daha yük almıştır. Daha sonra 1 numaralı noktaya gidip, 6 birim ürün talebini karşılamıştır. Son olarak da 3 numaralı noktaya gidip, 1 birim ürün talebini karşılayarak seyahatini tamamlayıp depoya dönüş yapmıştır.



Şekil 1. Çoktan-Çoka Toplama ve Dağıtım Problemi (Cordeau vd., 2008 (s. 327-357))

Çoktan-Çoka toplama ve dağıtım problemi başlığı altında literatürde üç farklı problem tipi bulunmaktadır. Birincisi, takas problemi (swapping problem), 1992 yılında Anily ve Hassin tarafından literatüre kazandırılmıştır (Anily ve Hassin, 1992). Bu problem çoktan çoka,  $n$  adet ürünlü olarak modellenmekte ve ürünlerin depo harici noktalar arasında tek bir araçla takas edilmesini konu edinmektedir (Berbeglia vd., 2007). İkincisi, tek ürünlü toplama ve dağıtım noktalı seyyar satıcı problemi (1-PDTSP) 2004 yılında Hernandez-Perez ve Salazar-Gonzales tarafından literatüre kazandırılmıştır (Hernandez-Perez ve Salazar-Gonzales, 2004). Problem bir depodan tek bir aracın toplama ve dağıtım noktalarındaki müşteri taleplerini karşılayacak şekilde modellenmektedir. Modellenen problem, dal ve kesme (branch and cut) sezgiseli ile çözülmüştür (Berbeglia vd., 2007). Üçüncü problem ise Q-teslimatlı seyyar satıcı problemi 1999 yılında Chalasani ve Motwani tarafından literatüre kazandırılmıştır (Chalasani ve Motwani, 1999). Bu problem tek araçlı ve tek ürünlü olarak modellenmiştir. Problem setindeki depo hariç her nokta tek birim ürünü ya talep ya da arz etmektedir (Berbeglia vd., 2007).

### 1.4.2. Birden-Çoka-Çoktan-Bire (One-to-Many-to-One) Toplama ve Dağıtım Problemi

Bu tip problemlerde taşınan ürün öncelikle depoda bulunmakta ve depodan farklı varış noktalarına dağıtılmakta veya taşınan ürünler farklı noktalardan alınarak depoda toplanmaktadır (Ayadi vd., 2014).

Şekil 2’de noktaların arz ve talep durumları  $(x,-y)$  olarak tanımlanmıştır. Yayılar üzerindeki sayılar ise araç yükünü göstermektedir. Örnekte araç seyahate depodan 10 birim yük ile başlamıştır. Daha sonra 1 numaralı noktaya gidip, 2 birim yük alıp 6 birim yük bırakmıştır. Seyahatine 6 birim yük ile devam eden araç 3 numaralı noktaya gidip, 3 birim yük alıp 1 birim yük bırakmıştır. 3 numaralı noktadan 2 numaralı noktaya 8 birim yük ile seyahat eden araç 2 numaralı noktadan 4 birim yük alıp, 2 birim yük bırakmıştır. Daha sonra 4 numaralı noktaya seyahat ederek 1 birim yük alıp, 1 birim yük bırakmıştır ve 10 birim yük ile tekrar depoya dönmüştür.



Şekil 2. Birden-Çoka-Çoktan-Bire Toplama ve Dağıtım Problemi (Cordeau vd., 2008 (s. 327-357))

Birden-Çoka-Çoktan-Bire toplama ve dağıtım probleminde bazen ürünler dağıtım ürünleri olarak adlandırılmakta ve bir depodan talebin olduğu noktalara teslim edilmektedir. Bazen de bu ürünler toplama ürünleri olarak adlandırılmakta ve çeşitli noktalardan depoya tekrar getirilmektedir. Bu tip problemlerle ters lojistiğin kullanıldığı alanlarda karşılaşılmaktadır (Berbeglia vd., 2007). Bir depodan dolu damacaların müşteriye taşındığı, boş damacaların da müşteriden alınıp tekrar depoda toplandığı bir damacana su teslimatçısı bu olaya örnek olarak verilebilir. Bu tip problemler genel olarak talep yapısına göre bileşik talepli ve tek talepli olarak ikiye ayrılmaktadır. Bileşik talebin olduğu problemlerde en az bir müşterinin pozitif toplama ve dağıtım talebi olurken, tek talebin olduğu problemlerde her müşterinin sıfır toplama ve dağıtım talebi

olmaktadır. Daha detaylı problem tipleri ve çözümleri için bakınız; Berbeglia vd., 2007; Gribkovskaia vd., 2007.

### 1.4.3. Bire-Bir (One-to-One) Toplama ve Dağıtım Problemi

Bu tip problemlerde taşınan her ürüne özel bir toplama noktası ve ona karşılık gelen özel bir dağıtım noktası bulunmaktadır (Ayadi vd., 2014). Şekil 3'te noktalar  $x$  birim ürün arz veya talep etmektedir. Pozitif başlıklı  $x$  noktası arz ederken negatif  $z$  başlıklı nokta talep etmektedir. Yayın üzerinde ise araç tarafından taşınan birim yük gösterilmektedir. Örnekte depodan seyahatine başlayan araç 1 numaralı noktaya uğrayarak  $a$  birim yük alıp 3 numaralı noktaya geçmiştir. 3 numaralı noktadan da  $b$  birim yük alıp seyahatine devam etmiştir. Daha sonra  $b$  birim yük talep eden 2 numaralı noktaya giderek ürünü bırakmıştır. 2 numaralı noktadan ise  $a$  birim yük talep eden 4 numaralı noktaya giderek bu talebi karşılamıştır. Hizmetini tamamlayan boş araç son olarak tekrar depoya dönmüştür.



Şekil 3. Bire-Bir Toplama ve Dağıtım Problemi (Cordeau vd., 2008 (s. 327-357))

Bire bir toplama ve dağıtım probleminde, her başlangıç noktasının belirli bir varış noktası bulunmakta ve bu toplama ve dağıtım noktaları birbiriyle eşleşmektedir. Bu özelliği ile bire bir toplama ve dağıtım problemi diğer iki tipten ayrılmaktadır (Sahin vd., 2013).

Bire-Bir toplama ve dağıtım problemlerinde her ürün için tek bir toplama ve dağıtım noktası bulunmaktadır. Bu problem tipi altında dört farklı ana problemden bahsetmek mümkündür. Birincisi, istifleyici vinç problemi (stacker crane problem) olarak bilinen problem, takas problemi (swapping problem) ve toplama ve dağıtım noktalı araç rotalama probleminin özel bir versiyonudur (Berbeglia vd., 2007). Bu problemde amaç, birim kapasiteli bir araç ile ürünlerin kaynağından varış noktasına taşınmasıdır. Toplama ve dağıtım noktalarının birim talebi olmakla birlikte deponun talebi veya arzı

bulunmayacak şekilde modellenmektedir. Bire-bir toplama ve dağıtım problemi başlığı altında karşımıza çıkan ikinci problem ise toplama ve dağıtım noktalı araç rotalama problemidir. Problemden amaç, bir filo aracın müşteri talebine göre, toplama ve dağıtım noktalarından (önce toplama noktasından) geçecek şekilde rotalanmasıdır. Bu problem daha sonra kendi altında tek araçlı ve çok araçlı olmak üzere iki alt başlığa ayrılmaktadır (Berbeglia vd., 2007).

Üçüncü problem tipi ise araç çağırma problemi (dial a ride problem), toplama ve dağıtım noktalı araç rotalama probleminin özel bir versiyonudur. Bu problemde bir noktadan alınıp bir varış noktasına bırakılan insanlar söz konusudur. Genellikle yaşlı ve engelli bireylerin ulaşımında, kapıdan alınıp kapıya bırakıldığı durumlarda karşımıza çıkmaktadır (Cordeau ve Laporte, 2003a). Zaman pencereleri, maksimum sürüş zamanı gibi kısıtlar, hizmet kalitesi ile alakalı kısıtlar bu problem tipinde sıkça karşılaşılmaktadır (bkz; Cordeau ve Laporte, 2003a; 2003b; Cordeau, 2006). Bu problem de kendi altında tek araçlı ve çok araçlı olarak incelenmektedir. Bu başlık altında incelenen dördüncü problem ise, toplama, dağıtım ve aktarma noktalı araç rotalama problemi olarak adlandırılmaktadır. Bu problemde başlangıç noktasından varış noktasına giden ürün farklı araçlar ile de taşınabilmektedir. Buna olanak sağlayan şey ise aktarma (transfer) noktalarının oluşudur. Bahsedilen transfer noktalarının eklenmesi, problemdeki nokta sayısını artırmasından dolayı problemin çözümünü daha da zor hale getirmektedir (Berbeglia vd., 2007).

Son yıllarda literatürdeki farklı bire bir toplama ve dağıtım problemlerinde kesin ve yaklaşık çözümler elde etmeye yarayan yeni algoritmalar kullanılmaya başlanmıştır. Bu algoritmalar “dal ve kesme (branch and cut)” ve “dal ve kesme ve fiyat (branch and cut and price)” gibi ayrıştırma teknikleri ve “tabu arama (tabu search)”, “benzetilmiş tavlama (simulated annealing)” ve “değişken komşu arama (variable neighbourhood search)” gibi sezgisel algoritmaların kullanımı ile oluşturulmaktadır (Cordeau vd., 2008 (s. 327-357)).



## 2. BÖLÜM: LİTERATÜR TARAMASI

Tez çalışması kapsamında üzerinde durulan bire bir toplama ve dağıtım problemi ile ilgili literatür taraması çoklu veritabanları içinde arama yapmayı sağlayan Web of Science<sup>2</sup> platformu üzerinden yapılmıştır. Sözkonusu platform üzerinde araç rotalama ile ilgili çalışmaları bulmak için “routing” anahtar sözcüğü ile konu (topic) esaslı arama yapıldıktan sonra, toplama ve dağıtım problemlerine ulaşmak için “pickup and delivery” ve bire bir dağıtım ağı yapısı için “one to one” anahtar sözcükleri ile ilgili arama daraltılmıştır. Arama sonucu bire bir toplama ve dağıtım problemi için erişime açık on dört adet makale bulunmuş ve ilgili makaleler detaylı olarak incelenmiştir.

Yapılan arama sonucu bulunan çalışmalar model tipi, amaç fonksiyonu, dağıtım planında kullanılan araç tipi ve sürdürülebilirlik kavramının ele alınma şekline göre incelenmiştir. Bulunan çalışmalarda kullanılan ve/veya bahsedilen araç tipleri homojen veya heterojen olarak sınıflandırılmaktadır. Bahsedilen bu konuları içeren literatür tablosu Tablo 1’de paylaşılmaktadır.

---

<sup>2</sup> Web of Science, <https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/web-of-science/>

#	Yazar	Model Tipi	Amaç Fonksiyonu	Araç Tipi	Sürdürülebilirlik
1	Cordeau vd., 2008 (s. 327-357)	Tamsayılı Doğrusal Programlama Dal ve Kesme (Branch ve Cut) algoritması Sezgiseller	Maliyet minimizasyonu	Homojen	-
2	Dumitrescu vd., 2010	Tamsayılı Doğrusal Programlama Dal ve Kesme (Branch ve Cut) algoritması	Maliyet minimizasyonu	Homojen	-
3	Oncan vd., 2011	Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama Dal ve Kesme (Branch ve Cut) algoritması	Mesafe minimizasyonu	Homojen	-
4	Demir ve Van Woensel, 2013	Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama	Yakıt tüketimi ve sürücü maliyeti minimizasyonu	Heterojen	Emisyon (taşımadan kaynaklı)
5	Mesa-Arango ve Ukkusuri, 2013	Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama Dal ve Sınır (Branch and Bound) algoritması	Maliyet minimizasyonu	Homojen	-
6	Sahin vd., 2013	Sezgiseller (Tabu Arama (Tabu Search), Benzetilmiş Tavlama (Simulated Annealing)) Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama	Mesafe minimizasyonu	Homojen	-
7	Treleaven vd., 2013	Polinom-zaman algoritmaları/SPLICE Algoritması	-	Homojen	-
8	Ayadi vd., 2014	Dal ve Sınır (Branch and Bound) algoritması	Servis kalitesini koruyarak seyahat süresi minimizasyonu	Homojen	-

Tablo 1. Bire bir toplama ve dağıtım problemi üzerine yapılan sayısal çalışmaları özetleyen literatür tablosu

#	Yazar	Model Tipi	Amaç Fonksiyonu	Araç Tipi	Sürdürülebilirlik
9	Guerriero vd., 2014	Sezgiseller (Tabu Arama (Tabu Search), Benzetilmiş Tavlama (Simulated Annealing)) Genetik algoritma (genetic algorithm)	Sürücülerin bekleme sürelerinin minimizasyonu	Homojen	-
10	Iori ve Riera-Ledesma, 2015	Tamsayılı Doğrusal Programlama Sezgiseller	Rotalama maliyeti minimizasyonu	Heterojen	-
11	Montero vd., 2017	Tamsayılı Doğrusal Programlama Sezgiseller	Maliyet minimizasyonu	Homojen	-
12	Haddad vd., 2018	Sezgiseller	Toplam mesafe minimizasyonu	Homojen	-
13	Soysal vd., 2018	Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama	Toplam teslimat giderlerinin minimizasyonu	Heterojen	Emisyon (taşımadan kaynaklı)
14	Factorovich vd., 2020	Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama Dal ve Kesme (Branch and Cut) algoritması	Maliyet minimizasyonu	Homojen	-
15	Bu tez çalışması	Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama	Maliyet minimizasyonu	Heterojen (dizel ve elektrikli araçlar)	Enerji kullanımı ve emisyon (taşımadan kaynaklı)

Tablo 1 (devamı). Bire bir toplama ve dağıtım problemi üzerine yapılan sayısal çalışmaları özetleyen literatür tablosu

İncelenen çalışmalarda problem tipine bakıldığında, bu teze konu olan toplama ve dağıtım probleminin geçerli problem tipi olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmalardaki problem tiplerinin, toplama ve dağıtım probleminin yanı sıra, geleneksel araç rotalama problemi (bkz. Demir ve Van Woensel, 2013; Iori ve Riera-Ledesma, 2015; Montero vd., 2017), seyyar satıcı problemi (Dumitrescu vd., 2010; Mesa-Arango ve Ukkusuri, 2013), araç çağırma problemi (dial a ride problem) (Ayadi vd., 2014; Guerriero vd., 2014) olarak da belirtildiği görülmektedir. Toplama ve dağıtım problemi literatürde araç rotalama probleminin bir alt başlığı olarak geçmektedir. Bu yüzden, bu bölümde incelenen direkt olarak toplama ve dağıtım problemi olarak tanımlanmayan, problem tipi araç rotalama olarak belirtilen çalışmalarda da toplama ve dağıtım noktalarının kullanıldığını not olarak düşmekte fayda vardır. Aynı şekilde seyyar satıcı problemi olarak belirtilen çalışmalarda, çoklu araçların, toplama ve dağıtım noktalarının kullanıldığı görülmektedir bu yüzden bu çalışmalar da toplama ve dağıtım problemi altında sınıflandırılmıştır. Araç çağırma problemi (dial a ride problem) ise bire bir toplama ve dağıtım problemi altında yer alan özel bir problemdir. Çoklu araç, çoklu ürün, zaman pencereleri gibi farklı kısıtların ve parametrelerin dahil olmasıyla birlikte problem tipleri farklı isimler almaktadır.

Bulunan çalışmalarda toplama ve dağıtım noktalarının varlığı ve birbirleriyle olan bağlantısı da incelenmektedir. Bilindiği üzere, toplama ve dağıtım problemi ulaşım, dağıtım ağının nasıl kurulduğuna göre “bire bir toplama ve dağıtım problemi, birden çokta çoktan bire toplama ve dağıtım problemi, çoktan çokta toplama ve dağıtım problemi” şeklinde sınıflandırılmaktadır. Literatür tablosunda yer alan çalışmalardaki problemler seyahatin belirli bir toplama noktasından belirli bir dağıtım noktasına olduğu “bire birlik” özelliği taşıması açısından incelendiğinde, problem tipi araç rotalama problemi veya seyyar satıcı problemi olarak belirtilmiş olsa bile, on dört adet çalışmada da bu kavramın bulunmakta ve modellerin ona göre kurulduğu görülmektedir.

Bu çalışmalardaki problemleri çözmek için kullanılan matematiksel model tiplerine baktığımızda farklı yöntemlerin tercih edildiği görülmektedir. Problem modellenirken çoğunlukla tamsayılı/karma tamsayılı programlama modelleri tercih edilmiş, çoğu sayısal çözüm yaklaşımı ise “dal ve sınır (branch and bound)”, “dal ve kesme (branch and cut)”, “tabu araması (tabu search)” gibi sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak oluşturulmuştur. Çeşitli değişken, parametre ve kısıtların olduğu araç

rotalama problemlerinde en iyiye yakın çözümleri garanti eden sezgisel algoritmalar çoğunlukla tercih edilmektedir.

Önerilen matematiksel modellerdeki amaç fonksiyonları ise farklılık göstermektedir. Kullanılan matematiksel modellerin büyük çoğunluğundaki amaç fonksiyonu maliyeti minimize edecek şekilde oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonlarındaki ele alınan maliyet kalemleri ise farklılık göstermektedir. Sürücü maliyeti, yakıt tüketim maliyeti, eğer zaman pencereleri varsa bekleme maliyeti, ceza maliyeti gibi farklı maliyetler minimize edilmektedir. Bununla birlikte, dağıtım planları elde edilirken, katedilen mesafeyi minimize eden amaç fonksiyonları da kullanılmıştır.

Sürdürülebilirlik kavramı incelendiğinde ise Soysal vd., (2018) ve Demir ve Van Woensel, (2013)'in çalışmalarında, karbon emisyonunu ve çevreye verilen zararı azaltmayı amaçlayan matematiksel modeller kurduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda, taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklanan emisyon ve yakıt tüketim maliyetleri eşanlı olarak minimize edilmeye çalışılmıştır. Problemlerde araç filosu heterojen araçlardan oluşmaktadır. Bu araçlar dizel motorlu araçlardan seçilmiş, elektrik motorlu araçlara yer verilmediği görülmüştür.

Literatürde, bire bir toplama ve dağıtım problemi üzerine yer alan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, araç filosunun dizel ve elektrikli araçlardan oluştuğu kabul edilmekte ve Karışık Tam Sayılı Programlama modeli kullanılarak farklı senaryolar üzerinde taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklanan yakıt tüketimi ve emisyon salınımı göstergeleri üzerinden değerlendirmeler yapılmaktadır. Çalışmanın bu yönüyle sürdürülebilir lojistik yönetimi konusuna katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

### 3. BÖLÜM: PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde, öncelikle bire bir toplama ve dağıtım probleminin tanımı yapılmakta, sonrasında ise ilgili problem matematiksel olarak ifade edilmektedir.

#### 3.1. PROBLEM TANIMI

Bu tez kapsamında üzerinde durulan bire bir toplama ve dağıtım problemi;  $V$  noktalar kümesi,  $A$  düğümler arası yollar (yaylar kümesi) olmak üzere ile  $G = \{V, A\}$  lojistik ağı üzerinde tanımlanmıştır. Noktalar kümesi  $V = \{P \cup D \cup \{0, 2n + 1\}\}$  şeklinde tanımlanmıştır. Toplama noktaları kümesinde ( $P = \{1, \dots, n\}$ ) bulunan her eleman için ona karşılık gelen bir dağıtım noktaları kümesi ( $D = \{n + 1, \dots, 2n\}$ ) elemanı bulunmaktadır. Lojistik ağında  $\{0, 2n + 1\}$  noktaları depoyu temsil etmektedir. Araçlar kümesi,  $K = \{1, \dots, m\}$  şeklinde ifade edilmiştir ve  $Q_k$ ,  $k$  aracının kapasitesini ifade etmektedir. Yollar kümesi ise  $A = \{(i, j): i = 0, j \in P \text{ veya } i, j \in P \cup D, i \neq j \text{ ve } i \neq n + j \text{ veya } i \in D, j = 2n + 1\}$  şeklinde tanımlanmaktadır (Cordeau vd., 2008 (s. 327-357)).

Toplama ve dağıtım probleminin bir tipi olan birebir toplama ve dağıtım probleminde taşınacak olan ürünün kendine ait özel bir çıkış ve varış noktasının olduğu varsayımı kabul edilmektedir (Ayadi vd., 2014). Probleme konu olan her teslimat talebi,  $i$  noktası  $n+i$  noktasından önce ziyaret edilmelidir (öncelik sırası ilişkisi) ve bu her iki nokta da aynı araç tarafından ziyaret edilmelidir (eşlilik ilişkisi) ifadelerini sağlayan koşullar ile kısıtlanmaktadır. Düğümler kümesindeki her nokta ( $i \in V$ ),  $q_0 = q_{2n+1} = 0$  ve her toplama noktası için pozitif talep olduğunu belirten  $q_i \geq 0$  ( $i \in P$ ) kısıtını ve buna karşılık gelen her dağıtım noktası için negatif talep olduğunu belirten  $q_i = -q_{i-n}$  ( $i \in D$ ) kısıtını sağlayan bir  $q_i$  yükü ile ilişkilendirilmiştir.

Noktalar kümesinin elemanları arasındaki mesafe, yaylar kümesinin elemanı olan her ikili için ( $(i, j) \in A$ )  $d_{ij}$  ile ifade edilmiştir. Araçların maksimum alabileceği yol ise  $range_k$  ile ifade edilmektedir. Noktalar kümesinin elemanları arasındaki seyahat süresi, yaylar kümesinin elemanı olan her ikili için ( $(i, j) \in A$ )  $t_{ij}$  ile ifade edilmiştir. Düğümler kümesindeki her nokta ( $i \in V$ ) için o noktada harcadığı vakit, hizmet süresi

$h_i$  ile ifade edilmektedir. Araçların, lojistik ağında seyahatleri süresine göre sürücü maaşı belirlenmektedir.

Problemde yer alan  $X$  değişkeni, eğer araç rota üzerinde yol alırsa, 1 değeri alan ikili değişken olarak tanımlanmaktadır ( $X \in \{0,1\}$ ).  $Y$  değişkeni aracın yapay depo hariç ziyaret ettiği noktalarda hizmete başladığı anı ifade etmektedir.  $F$  değişkeni aracın rota üzerindeki noktalar arasındaki taşıdığı yük miktarını ifade etmektedir. Son olarak  $S$  değişkeni aracın ilgili yüklerin dağıtımını tamamlayıp, tekrar depoya dönüş yaptığı sürede harcadığı toplam zamanı ifade eden değişkendir.

Tanımlanan problem, bahsedilen varsayımları dikkate alan, sürücü ve yakıt maliyetini minimize eden dağıtım planını elde etmeyi amaçlamaktadır (Soysal vd., 2018).

### 3.2. BİRE BİR TOPLAMA VE DAĞITIM PROBLEMİ İÇİN KARIŞIK TAM SAYILI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA MODELİ

Bu bölümde, söz konusu bire bir toplama ve dağıtım problemi, Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama yaklaşımı kullanılarak matematiksel olarak ifade edilmektedir. Tablo 2 modelde kullanılan parametreler ve karar değişkenlerini göstermektedir.

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 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 kullanılacak araçlar kümesi, $K = \{1, \dots, m\}$
$q_i$	$i \in P$ toplama noktasından alınıp $i + n \in D$ dağıtım noktasına taşınacak ürün miktarı, kilogram
$Q_k$	$k \in K$ aracının kapasitesi, kilogram
$t_{ij}$	$(i, j) \in A$ yolunun seyahat süresi, dakika
$h_i$	$i \in V$ noktasındaki hizmet süresi, dakika

Tablo 2. Parametreler ve karar değişkenleri

Sembol	Açıklama
$M$	Büyük bir sayı
$f_k$	$k$ aracının km başına yakıt tüketim maliyeti, TL/km
$range_k$	$k$ aracının maksimum gidebileceği yol uzunluğu, km
$d_{ij}$	Mesafe, km
$wage$	Dakika başına sürücünün maaşı, TL/dk
$X_{ijk}$	$k \in K$ aracı $(i, j) \in A$ yolunda seyahat ediyorsa 1, değilse 0 değeri 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

Tablo 2 (devamı). Parametreler ve karar değişkenleri

Amaç fonksiyonu ile başlayarak matematiksel model aşağıdaki gibi kurulmuştur. Modelin oluşturulmasında Soysal vd. (2018) tarafından önerilen matematiksel modelden faydalanılmıştır. Soysal vd. tarafından geliştirilen modelden farklı olarak bu çalışmada önerilen matematiksel model, araçların maksimum kat edebileceği mesafeyi dikkate almakta ve farklı bir amaç fonksiyonu içermektedir.

Minimize (En küçükle)

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

Kısıt seti altında (subject to);

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

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



$$\sum_{j \in V: (i,j) \in A} X_{i,j,k} - \sum_{j \in V: (n+i,j) \in A} X_{n+i,j,k} = \mathbf{0}, \quad \forall i \in P, k \in K \quad (3)$$

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

$$Y_{i,k} \leq Y_{i+n,k}, \quad \forall i \in P, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V: (j,i) \in A} F_{j,i,k} - \sum_{k \in K} \sum_{j \in V: (i,j) \in A} F_{i,j,k} = -q_i, \quad \forall i \in P \quad (6)$$

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

$$F_{i,j,k} - Q_k X_{i,j,k} \leq \mathbf{0}, \quad \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in P} F_{0,i,k} = \mathbf{0} \quad (9)$$

$$Y_{i,k} - Y_{j,k} + h_i + t_{i,j} \leq M(1 - X_{i,j,k}), \quad \forall i, j \in V \setminus \{2n+1\}: (i,j) \in A, k \in K \quad (10)$$

$$Y_{j,k} + h_j - S_{j,k} + t_{j,2n+1} \leq M(1 - X_{j,2n+1,k}), \quad \forall j \in D, k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} X_{i,j,k} d_{i,j} \leq \text{range}_k, \quad \forall k \in K \quad (12)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (13)$$

$$Y_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in V \setminus \{2n + 1\}, k \in K \quad (14)$$

$$F_{ijk} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (15)$$

$$S_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in D, k \in K \quad (16)$$

Problemin çözümü için kurulan matematiksel modelde amaç fonksiyonu, sürücü maliyetini ve yakıt tüketim maliyetini minimize etmektedir. 1, 2 ve 3 numaralı kısıtlar her toplama noktasının aynı araç tarafından yalnızca bir kere ziyaret edilmesini sağlayan kısıtlardır. 2, 3 ve 4 numaralı kısıtlar her aracın seyahatine depodan başlamasını ve depoda bitirmesini garanti etmektedir. 5 numaralı kısıt kümesi k aracının depodan ayrıldıktan sonra önce ilgili toplama noktasını ziyaret etmesini sağlamaktadır.

6 ve 7 numaralı kısıtlar toplama ve dağıtım noktalarında akışın korunumunu sağlayan kısıtlardır. Altıncı kısıt toplama noktaları için arzın, yedinci kısıt ise dağıtım noktaları için talebin doğru şekilde karşılanması için eklenmiştir. 8 numaralı kısıt kümesi k aracının kapasitesinin aşılmamasını sağlayan kısıttır. 9 numaralı kısıt kümesi ise k aracının depodan ayrılırken herhangi bir ürün taşımadığını, boş olduğunu göstermektedir

10 ve 11 numaralı kısıtlar k aracının rota üzerinde toplama ve dağıtım noktalarını ziyaret ettiği zamanlar, bu noktalardaki hizmet süreleri ve noktaları arası seyahat sürelerini dikkate alınarak oluşturulmuş zaman kısıtlarıdır. Büyük M değeri kullanılarak kısıtın sağ tarafının oldukça büyük bir sayısal değer alması amaçlanmıştır. 12 numaralı kısıt kümesinin ise k aracının kendisi için daha önceden belirlenmiş kilometre sınırını geçemeyeceğini gösteren kısıttır. Son olarak 13-16 arasındaki kısıtlar karar değişkenleri ile ilgili sınırlamaları ifade etmektedir.

## 4. BÖLÜM: NÜMERİK ANALİZLER

Bu bölümde, tez kapsamında yapılmış nümerik analizler hakkında bilgi verilmektedir. Nümerik analizlerin temel amacı, önerilen matematiksel modelin uygulanabilirliğini göstermek, kullanımından elde edilecek faydaları ortaya koymak ve farklı senaryolar üzerinde taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklanan yakıt tüketimi ve emisyon salınımı göstergeleri üzerinden değerlendirmeler yapmaktır.

Bu bölümde ilk olarak, bir örnek problem oluşturulup, sonrasında çözülmektedir. Bu kapsamda, öncelikle oluşturulan problem tanıtılmakta, izleyen kısımda ise elde edilen çözümler ve ilgili performans göstergeleri sunulmaktadır. İkinci olarak, örnek problemde bulunan temel parametreler üzerinde değişiklikler yapılarak duyarlılık analizleri yapılmaktadır. Son bölümde ise, örnek probleme alternatif, çevreye verilen zararı azaltmayı amaçlayan yeni senaryolar oluşturulmuştur.

Nümerik analizler kapsamında, problem için geliştirilen matematiksel modelin çözümünde IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6.1 yazılımı kullanılmıştır. Oluşturulan senaryoların optimal çözümü Intel Core i5-3210M 2.50 GHz işlemcili, 64 bit işletim sistemli, 8 GB belleğe sahip bir bilgisayarla elde edilmiştir.

### 4.1. ÖRNEK PROBLEM VE ÇÖZÜMÜ

Bu bölümde örnek bir problem üzerinde değerlendirmeler yapılmaktadır.

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

Örnek problem, Southampton Üniversitesinin “The Pollution-Routing Problem Instance Library<sup>3</sup>” başlıklı veri kütüphanesinden alınan veriler kullanılarak oluşturulmuştur. İlgili kütüphanede yer alan veriler Birleşik Krallık şehirleri üzerinde rastgele seçilip oluşturulmuştur. Örnek problem kapsamında kullanılan parametreler, parametrelerin değerleri, birimleri ve kaynakları Tablo 3’te gösterilmektedir.

<sup>3</sup> PRP Kütüphanesi: (10.01.2020, <http://www.apollo.management.soton.ac.uk/prplib.htm>)

Sembol	Açıklama	Birim	Kaynak
P	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7	Adet	PRP Kütüphanesi <sup>3</sup>
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		
A	189		
K	1 Dizel, 1 Elektrikli	Adet	Varsayım
$q_i$	Bakınız Tablo 4	Kg	PRP Kütüphanesi <sup>3</sup>
$Q_k$	Dizel: 3650, Elektrikli:635	Kg	Teknik Özellikler <sup>4</sup>
$t_{ij}$	Bakınız Tablo 7	Dakika	Varsayım
$h_i$	Bakınız Tablo 5	Dakika	PRP Kütüphanesi <sup>3</sup>
M	Büyük bir sayı		Varsayım
$f_k$	Dizel: 1, Elektrikli: 0,025	TL/km	Teknik Özellikler <sup>4</sup>
$range_k$	Dizel: Sınır yok, Elektrikli: 400	Km	Teknik Özellikler <sup>4</sup>
$d_{ij}$	Bakınız Tablo 6	Metre	PRP Kütüphanesi <sup>3</sup>
$wage$	0,5	TL/dk	Varsayım

Tablo 3. Modelde kullanılan parametreler, parametrelerin değerleri, birimleri ve kaynakları

Problemde depoyu temsil eden bir nokta, 7 adet toplama noktası ( $P = \{P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7\}$ ), 7 adet dağıtım noktası ( $D = \{D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7\}$ ) ve seyahat sonunda tekrar depoya dönüldüğünü gösteren yapay depo noktası bulunmaktadır. Problem kapsamında P1'den alınan yük D1'e teslim edilmek durumundadır, buna bağlı olarak diğer teslimat ilişkileri şu şekildedir: (P2-D2), (P3-D3), (P4-D4), (P5-D5), (P6-D6), (P7-D7). Tüm noktalar kümesi depo, yapay depo, toplama noktaları ve dağıtım noktalarından oluşmaktadır ( $V = \{Depo, P, D, Yapay Depo\}$ ).

<sup>4</sup> Teknik özellikler: (10.01.2020, <https://www.alke.com/doc/technical-specs-alke-ATX320E.pdf>)

Örnek problemde toplama ve dağıtım faaliyetlerinin yapılmasında kullanılmak üzere 2 adet araç (K1, K2) olduğu varsayılmaktadır. Araçlar depodan başlamak şartıyla noktalar arasında seyahat edebilmektedir. Araçların ilki yük taşımacılığı için uygun dizel motorlu bir araç, diğeri ise elektrik motorlu araçtır. Elektrikli araç için Alke ATX 320E modelinin kullanılması uygun görülmüştür<sup>5</sup>. Bu modelde 10 kWsa kapasiteli 8 adet 6V'luk kurşun asit akü bulunmaktadır. Araçların teknik özellikleri Tablo 3'te paylaşılmıştır.

Toplama noktasından alınıp, ona karşılık gelen dağıtım noktasına taşınacak yük miktarı her toplama noktası için kilogram biriminden Tablo 4'te verilmektedir.

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

Tablo 4. Toplama noktaları kümesi için yükler (kg)

Aracın seyahatine başlayıp sırasıyla toplama ve dağıtım noktalarına uğrayarak tekrar depoya dönüşü sırasında, bütün noktalarda belirlenmiş hizmet süreleri dakika olarak Tablo 5'te sunulmaktadır.

V	Depo	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Yapay Depo
Hizmet süresi	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

Tablo 5. Tüm noktalar kümesindeki her nokta için hizmet süreleri (dk)

Noktalar arası mesafeler ( $d_{ij}$ ) Tablo 6'da verilmektedir. Ortalama araç seyahat hızının 80 km/sa olduğu varsayılmıştır. Noktalar arası mesafelerin bu değere bölünmesi ile de seyahat süreleri ( $t_{ij}$ ) hesaplanmıştır. İlgili seyahat süreleri ise Tablo 7'de sunulmaktadır.

<sup>5</sup> Alke ATX320E: (10.01.2020, <https://www.alke.com/electric-vehicles-atx320e>)

$d_{ij}$ (km)	Depo	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Yapay Depo
Depo	0,0	50,9	92,8	91,4	96,5	75,9	76,2	49,3	69,7	64,6	49,7	24,3	45,0	91,2	81,4	94,6
P1	51,1	0,0	137,8	103,6	92,2	82,3	52,1	15,3	45,5	59,5	21,2	72,6	23,2	83,5	58,0	142,9
P2	92,8	137,7	0,0	141,0	111,5	95,0	144,9	132,2	137,9	137,7	128,9	69,4	122,5	114,9	133,5	31,2
P3	91,0	103,6	141,4	0,0	202,4	162,2	149,8	115,4	143,2	50,1	120,5	89,1	117,0	193,4	157,1	118,6
P4	96,2	91,9	111,3	202,8	0,0	23,1	60,0	79,6	52,8	149,2	72,5	115,1	71,4	9,8	42,1	135,0
P5	75,9	82,1	94,9	162,3	23,1	0,0	56,3	69,8	48,9	135,5	62,8	94,8	59,7	20,6	40,5	118,6
P6	76,4	52,1	144,8	149,6	60,4	56,3	0,0	39,8	8,0	109,2	32,8	100,0	33,4	52,3	20,6	166,5
P7	49,5	15,3	132,3	115,4	79,9	70,0	39,8	0,0	33,2	71,2	8,9	73,1	11,0	71,1	45,6	143,4
D1	69,8	45,5	137,8	143,0	53,2	49,0	8,0	33,2	0,0	102,6	26,2	93,4	26,7	45,0	14,1	159,9
D2	64,6	59,1	137,8	50,1	149,2	135,8	108,7	70,8	102,2	0,0	77,9	70,0	78,6	140,5	114,6	135,3
D3	49,4	21,2	128,7	120,0	72,8	62,9	32,7	8,9	26,2	78,3	0,0	73,1	7,2	64,1	38,6	143,4
D4	24,3	72,7	69,4	89,1	115,5	95,0	100,1	73,2	93,5	70,0	73,6	0,0	68,8	110,3	105,3	71,2
D5	45,1	23,2	122,2	117,0	71,2	59,8	33,5	11,0	26,9	78,9	7,1	68,7	0,0	62,2	39,3	139,0
D6	91,3	83,7	114,6	194,0	10,3	20,6	52,3	71,4	45,2	140,8	64,4	110,2	62,6	0,0	34,5	138,4
D7	82,0	58,0	133,3	156,8	42,5	40,6	20,4	45,7	14,1	115,0	38,7	105,6	39,2	34,3	0,0	157,0
Yapay Depo	94,7	143,1	31,0	118,4	135,1	118,6	166,4	143,6	159,9	135,4	144,0	71,4	139,2	138,5	157,2	0,0

Tablo 6. Tüm noktalar (düğümler) arası mesafeler matrisi

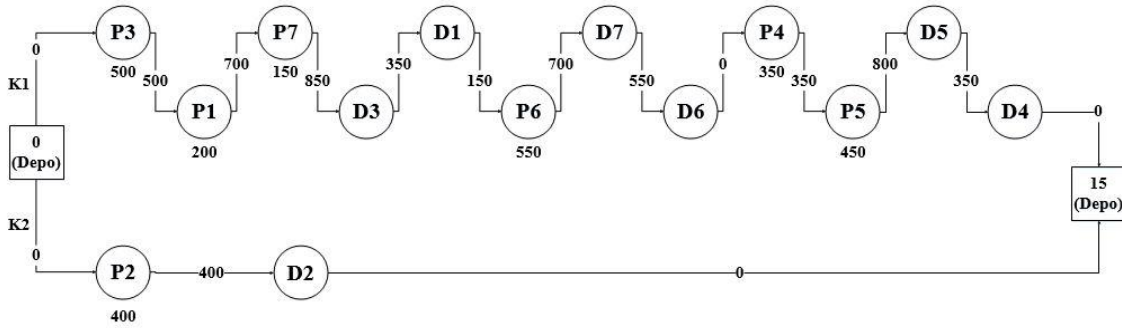
$t_{ij}$ (dk)	Depo	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Yapay Depo
Depo	0,0	38,2	69,6	68,6	72,3	56,9	57,2	37,0	52,2	48,5	37,3	18,2	33,7	68,4	61,1	70,9
P1	38,3	0,0	103,3	77,7	69,2	61,7	39,1	11,5	34,2	44,6	15,9	54,5	17,4	62,6	43,5	107,2
P2	69,6	103,3	0,0	105,7	83,6	71,2	108,7	99,2	103,4	103,3	96,7	52,1	91,9	86,1	100,1	23,4
P3	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
P4	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
P5	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
P6	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
P7	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
D1	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
D2	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
D3	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
D4	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
D5	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
D6	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
D7	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
Yapay Depo	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

Tablo 7. Tüm noktalar (düğümler) arası seyahat süreleri matrisi

#### 4.1.2. Örnek Problem Sonuçları

Örnek problem için, optimal (en iyi) çözümün elde edilmesi yaklaşık 1 saat 12 dakika sürmüştür. Bulunan en iyi çözüm için yakıt maliyeti 550,52 TL, sürücü maliyeti ise 450,05 TL olarak değer almış, dolayısıyla toplam maliyet 1000,57 TL olarak hesaplanmıştır.

Araçların izledikleri rota Şekil 4'te gösterilmektedir. Birinci araç (dizel, K1) 541,37 km'lik yolu 601,02 dakikada seyahat ederek 6 adet ikili (i-j) toplama ve dağıtım noktası için hizmet verirken, ikinci araç (elektrikli, K2) ise 365,79 km'lik yolu 299,07 dakikada seyahat edip sadece 1 adet ikili (i-j) toplama ve dağıtım noktası için hizmet vermektedir.



Şekil 4. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Birinci ve ikinci aracın rotası, hangi yayda kaç kilogram yük taşıdığı ve j noktasına varış zamanı Tablo 8'de sunulmaktadır.

Araçlar	<i-j>	Yük (kg)	j noktasına varış zamanı (dk)	Seyahat edilen yol (km)
<b>K1</b>	<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

Tablo 8. 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)
<b>K1</b>	<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
<b>K2</b>	<Depo-P2>	0	69,56	92,75
	<P2-D2>	400	186,09	137,73
	<D2-Yapay Depo>	-	299,07	135,31

Tablo 8 (devamı). K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) aracının rotası, taşıdığı yük miktarı, j noktasına varış zamanı ve seyahat ettiği yol

#### 4.2. DUYARLILIK ANALİZLERİ

Bu bölümde, modelde kullanılan temel parametre değerleri (yük, araç kapasitesi, yakıt maliyeti, sürücü maliyeti, aracın aldığı maximum yol ve toplama – dağıtım noktaları) üzerinde değişiklikler yapılarak duyarlılık analizi yapılmaktadır. Duyarlılık analizinin amacı, ilgili temel parametrelerdeki değişimin dağıtım planı ve dolayısıyla temel performans göstergeleri üzerindeki etkisini incelemektir. Bu kapsamda, öncelikle oluşturulan senaryolar açıklanmakta sonrasında ise elde edilen en iyi çözümler paylaşılmaktadır. Tablo 9 incelenen senaryoları ve elde edilen çözümleri göstermektedir.

Senaryo Adı	Araç	Rota	Sürücü Maliyeti (TL)	Yakıt Maliyeti (TL)	Toplam Maliyet (TL)	CO <sub>2</sub> eşdeğer emisyon (Kg)	Maliyet Farkı (%)	Emisyon Farkı (%)	Rota Değişikliği	Çözüm Süresi (dk)
Örnek Problem	K1	Depo-P3-P1-P7-D3-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-Yapay Depo	450,05	550,52	1000,57	231,04	-	-	-	72
	K2	Depo-P2-D2-Yapay Depo								
Q1 (Yarı Yük)	K1	Depo-P2-P3-D2-D3-Yapay Depo	447,53	514,91	962,44	218,73	-3,81	-5,33	✓	33
	K2	Depo-P1-P7-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-Yapay Depo								
Q2 (2 Katı Yük)	K1	Depo-P2-P3-D2-P1-D3-P6-D1-D6-P4-P5-D5-D4-Yapay Depo	460,46	689,25	1149,71	279,06	14,91	20,78	✓	25
	K2	Depo-P7-D7-Yapay Depo								
C1 (Yarı Kapasite)	K1	Depo-P2-P3-D2-P1-D3-P6-D1-D6-P4-P5-D5-D4-Yapay Depo	460,46	689,25	1149,71	279,06	14,91	20,78	✓	38
	K2	Depo-P7-D7-Yapay Depo								
C2 (1,5 Katı Kapasite)	K1	Depo-P2-P3-D2-D3-Yapay Depo	447,53	514,91	962,44	218,73	-3,81	-5,33	✓	57
	K2	Depo-P1-P7-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-Yapay Depo								

Tablo 9. 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

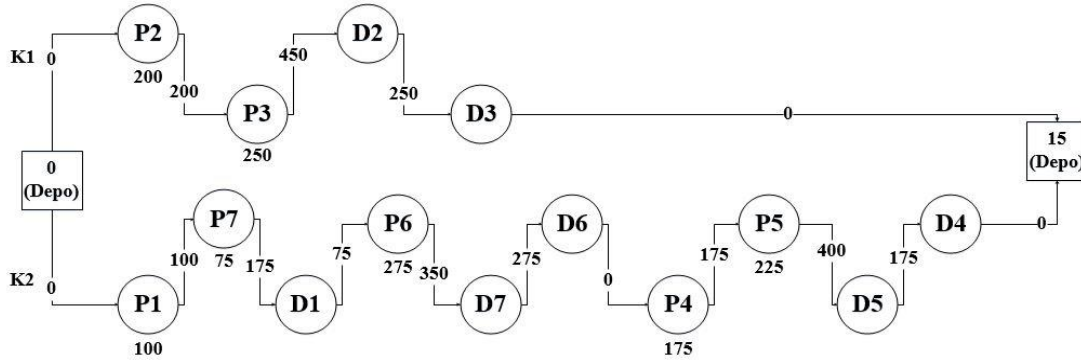
Senaryo Adı	Araç	Rota	Sürücü Maliyeti (TL)	Yakıt Maliyeti (TL)	Toplam Maliyet (TL)	CO <sub>2</sub> eşdeğer emisyon (Kg)	Maliyet Farkı (%)	Emisyon Farkı (%)	Rota Değişikliği	Çözüm Süresi (dk)
F1 (Yarı Yakıt Maliyeti)	K1	Depo-P3-P1-P7-D3-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-Yapay Depo	450,05	275,26	725,31	231,04	-27,51	0		441
	K2	Depo-P2-D2-Yapay Depo								
F2 (1,5 Katı Yakıt Maliyeti)	K1	Depo-P3-P1-P7-D3-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-Yapay Depo	450,05	825,78	1275,83	231,04	27,51	0		11
	K2	Depo-P2-D2-Yapay Depo								
W1 (Yarı Maaş)	K1	Depo-P3-P1-P7-D3-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-Yapay Depo	225,03	550,52	775,55	231,04	-22,49	0		6
	K2	Depo-P2-D2-Yapay Depo								
W2 (1,5 Katı Maaş)	K1	Depo-P3-P1-P7-D3-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-Yapay Depo	675,07	550,52	1225,59	231,04	22,49	0		580
	K2	Depo-P2-D2-Yapay Depo								
R1 (300 km Max Yol)	K1	Depo-P2-P3-D2-P1-P7-D3-D1-P6-D7-D6-P4-D4-Yapay Depo	457,66	659,71	1117,37	268,75	11,67	16,32	✓	69
	K2	Depo-P5-D5-Yapay Depo								
R2 (600 km Max Yol)	K1	Depo-P1-P7-D1-P6-D7-D6-P4-P5-D5-D4-Yapay Depo	462,31	409,01	871,32	185,16	-12,92	-19,86	✓	28
	K2	Depo-P2-D2-P3-D3-Yapay Depo								

Tablo 9 (devamı). 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 Adı	Araç	Rota	Sürücü Maliyeti (TL)	Yakıt Maliyeti (TL)	Toplam Maliyet (TL)	CO <sub>2</sub> eşdeğer emisyon (Kg)	Maliyet Farkı (%)	Emisyon Farkı (%)	Rota Değişikliği	Çözüm Süresi (dk)
PD1 (Delivery Noktaları)	K1	Depo-P3-P2-P5-P4-D6-D3-D5-D4-Yapay Depo	466,33	581,67	1048	243,71	4,74	5,48	✓	113
	K2	Depo-P1-P7-D1-D7-P6-D2-Yapay Depo								
PD2 (Pickup Noktaları)	K1	Depo-D4-D1-D5-P5-P4-D6-D7-P6-P7-P1-Yapay Depo	428,82	431,72	860,54	184,79	-14	-20,02	✓	40
	K2	Depo-D3-P3-D2-P2-Yapay Depo								

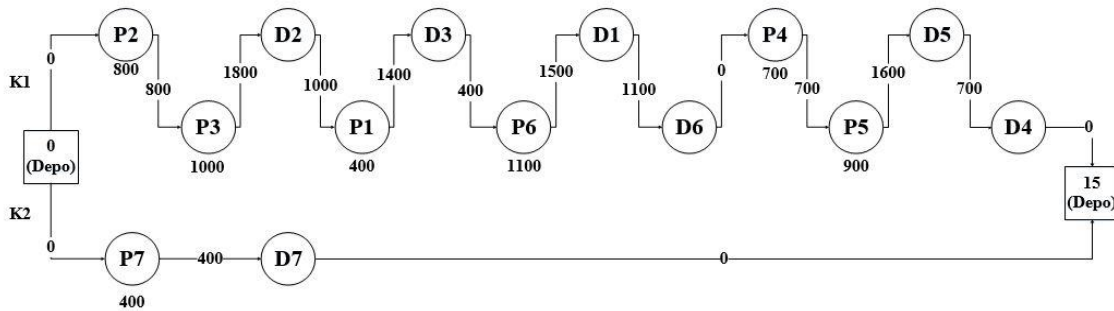
Tablo 9 (devamı). Senaryolar, araçların izledikleri rota, sürücü maliyeti, yakıt maliyeti, toplam maliyet, CO<sub>2</sub> emisyon değerleri ve örnek senaryoya kıyasla maliyet ve emisyon değerleri farkı

İlk olarak toplama noktalarından alınacak yük miktarının yarıya indirildiği bir senaryo (Q1) oluşturulmuş ve çözülmüştür. Araçların izledikleri rota ve noktalar arası taşıdıkları yük miktarları Şekil 5'te paylaşılmıştır.



Şekil 5. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Oluşturulan ikinci senaryoda (Q2) toplama noktalarından alınacak yük miktarı iki katına çıkarılmış ve problem buna göre değişiklik yapılarak tekrar çözülmüştür. Araçların izledikleri rota ve noktalar arası taşıdıkları yük miktarları Şekil 6'da paylaşılmıştır.



Şekil 6. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Daha sonra, araç kapasitesi parametresi üzerinde değişiklikler yapılarak iki farklı senaryo oluşturulmuştur. Oluşturulan ilk senaryoda (C1), araç kapasitesi her iki araç için de yarıya düşürülmüş ve problem tekrar çözülmüştür. Dağıtım planının ise Q2 isimli senaryoda elde edilen plan ile aynı olduğu görülmüştür.

Araç kapasiteleri 1.5 katları ile çarpılarak oluşturulan ikinci senaryoda (C2) ise, çözüm ve rotalar örnek problemden farklılık göstermektedir. Birinci aracın kapasitesinin 3650 yerine 5475, ikinci aracın kapasitesinin ise 635 yerine 952,5 kilogram olduğu bu senaryoda ortaya çıkan rota ise, yukarıda açıklanan yük miktarının yarıya indirildiği Q1 isimli senaryo ile aynı şekilde olduğu görülmüştür.

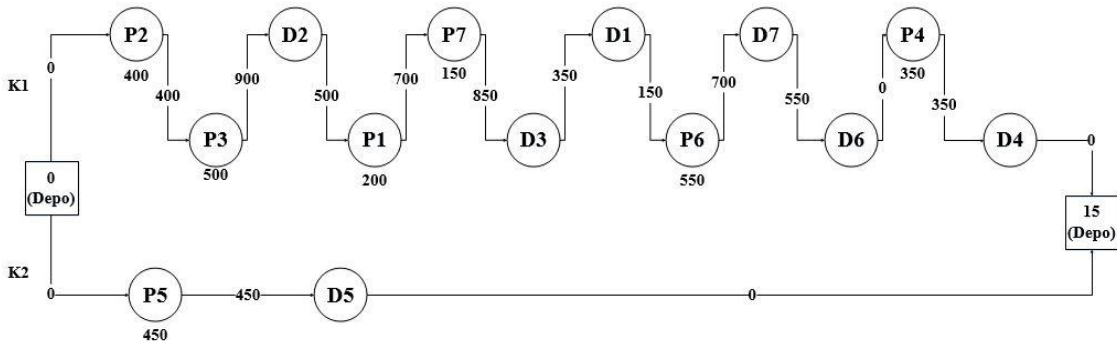
Üçüncü olarak yakıt maliyeti parametresi üzerinde değişiklikler yapılarak iki farklı senaryo daha oluşturulmuştur. Bu senaryoların ilkinde (F1), yakıt maliyeti yarıya düşürülmüş ve model tekrar çözülmüştür. Çözümde yakıt maliyeti parametresi yarıya düşürüldüğü için yakıt maliyeti örnek problemdeki değerlerin yarısı olacak şekilde hesaplanmıştır, onun haricindeki amaç fonksiyonu değerleri, araçların seyahat ettikleri kilometreler ve dağıtım planları örnek problem ile birebir aynıdır.

Yakıt tüketimi parametresinin 1.5 katı ile çarpılarak oluşturulan bir diğer senaryo (F2) ise, sadece yakıt tüketim maliyeti açısından örnek problem ile farklılık göstermektedir.

Daha sonra sürücü maaşı parametresi üzerinde değişiklikler yapılarak iki farklı senaryo daha oluşturulmuştur. Sürücü maaşı 0,5 TL/dk'dan 0,25 TL/dk'ya yani yarıya düşürülmüş (W1) ve problem tekrar çözülmüştür. Oluşturulan bu senaryoda sürücü maliyeti parametresi yarıya düşürüldüğü için sürücü maliyetinin yarı oranda azaldığı, diğer amaç fonksiyonu değerleri ve dağıtım planının değişmediği görülmektedir.

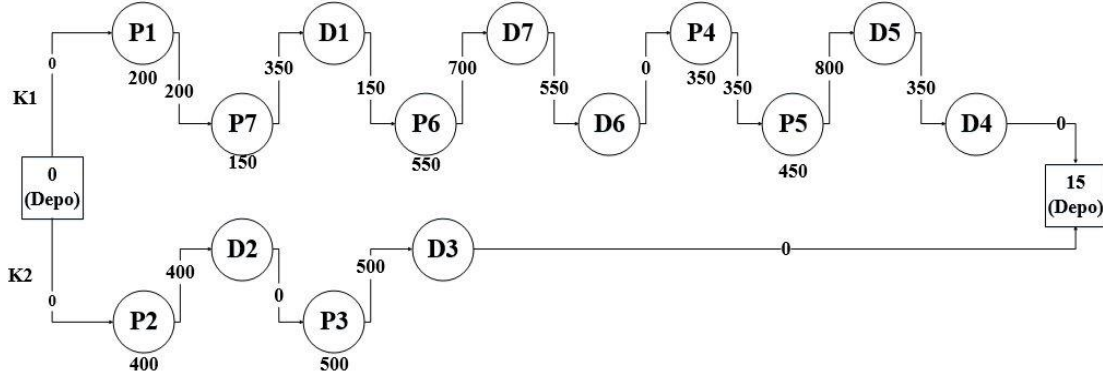
Sürücü maaşı parametresinin 0,5 TL/dk yerine 0,75 TL/dk olacak şekilde değiştirilip oluşturulan diğer senaryoda (W2) ise, sürücü maliyeti parametresi 1,5 katına çıkarıldığı için sürücü maliyetinin bu oranda arttığı, diğer amaç fonksiyonu değerleri ve dağıtım planının değişmediği görülmektedir.

Devamında, araçların alabileceği maksimum yol parametresinde elektrik motorlu araç için değişiklik yapılarak iki senaryo oluşturulmuştur. Örnek problemde 400 km olan 2 numaralı aracın alabileceği maksimum yol 300 km'ye düşürülmüş (R1) ve problem tekrar çözülmüştür. İkinci aracın alabileceği maksimum yol parametresinde yapılan bu değişiklik, araçlar için farklı rotalar oluşturmuş, sonuçta da daha maliyetli bir çözüm elde edilmiştir. Araçların izledikleri rota ve noktalar arası taşıdıkları yük miktarları Şekil 7'de paylaşılmıştır.



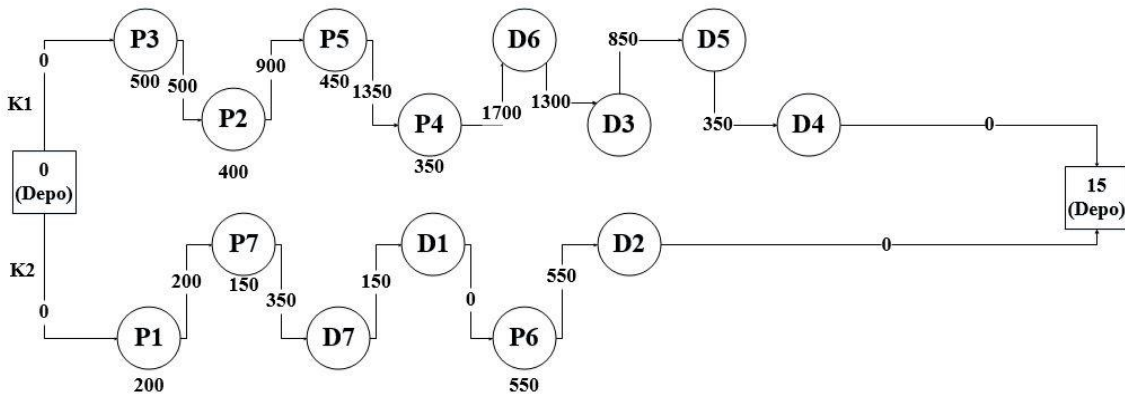
Şekil 7. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Oluşturulan ikinci senaryoda (R2) ise, 2 numaralı aracın alabileceği maksimum yol bu sefer 400 km'den 600 km'ye çıkarılmış ve problem tekrar çözülmüştür. Dağıtım planında kullanılan araçların izledikleri rotalar Şekil 8'de gösterilmiştir.



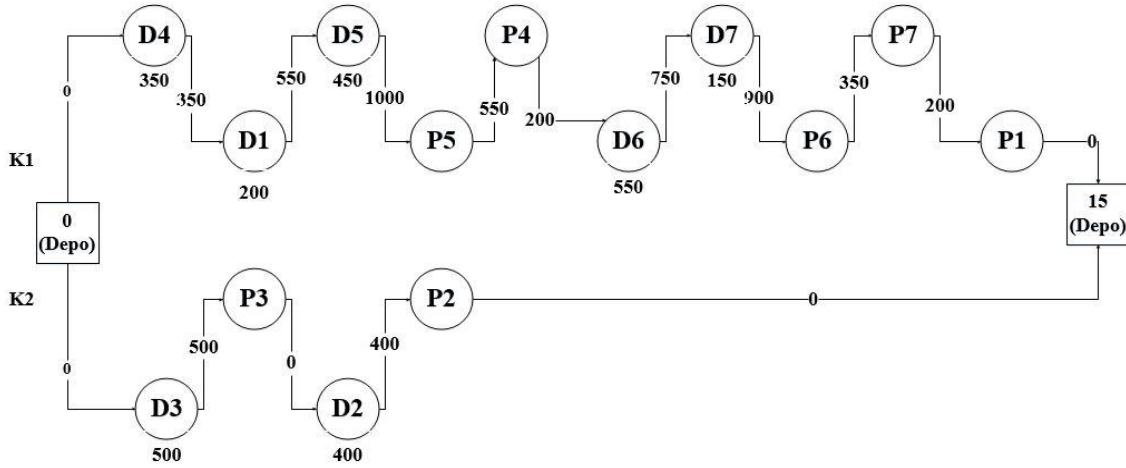
Şekil 8. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Son olarak toplama ve dağıtım noktaları üzerinde değişiklikler yapılarak iki farklı senaryo daha oluşturulmuş ve ortaya çıkan rotalar ve amaç fonksiyonu değerleri incelenmiştir. Oluşturulan ilk senaryoda (PD1) dağıtım noktaları tersten ardışık olarak sıralanmış ve toplama noktalarıyla eşleştirilmiştir. Örnek problemde (P1-D1) (P2-D2) (P3-D3) (P4-D4) (P5-D5) (P6-D6) (P7-D7) şeklinde ikili toplama ve dağıtım noktaları eş iken, bu senaryoda bu ikililer (P1-D7) (P2-D6) (P3-D5) (P4-D4) (P5-D3) (P6-D2) (P7-D1) şeklinde eşleştirilmiştir. Örneğin, örnek problemde 1 numaralı toplama noktasından alınan yük 1 numaralı toplama noktasına teslim edilirken, oluşturulan bu senaryoda 1 numaralı toplama noktasından alınan yük 7 numaralı dağıtım noktasına teslim edilecek şekilde veriler düzenlenip problem tekrar çözülmüştür. Araçların izledikleri rota, noktalar arası taşıdıkları yük miktarları Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Oluşturulan ikinci senaryoda (PD2) ise, toplama ve dağıtım noktaları yer değiştirilmiş ve problem tekrar çözülmüştür. Örnek problemde (P1-D1) (P2-D2) (P3-D3) (P4-D4) (P5-D5) (P6-D6) (P7-D7) şeklinde ikili toplama ve dağıtım noktaları eş iken, bu senaryoda bu ikililer (D1-P1) (D2-P2) (D3-P3) (D4-P4) (D5-P5) (D6-P6) (D7-P7) şeklinde eşleştirilmiştir, yani örnek problemde dağıtım noktası olan noktalar toplama noktası olmuş, toplama noktası olan noktalar ise dağıtım noktası olmuştur. Araçların izledikleri rota, noktalar arası taşıdıkları yük miktarları ise Şekil 10'da paylaşılmıştır.



Şekil 10. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Sonuç olarak, toplamda oluşturulan 12 farklı senaryo için oluşan rotaları inceleyip örnek problem ile karşılaştırdığımızda, 8 senaryoda araçların dağıtım planları değişirken, toplamda 6 farklı dağıtım planının oluştuğu görülmüştür. Bu 12 farklı senaryonun optimal çözümlerinde yer alan amaç fonksiyonu değerleri örnek problem ile karşılaştırıldığında ise, amaç fonksiyonunu değerlerinin değiştiği görülmektedir. Bu değişiklikler, bazı senaryolar için farklı dağıtım planları oluştuğu ve araçlar farklı kilometreler seyahat ettiği için oluşmuştur. Diğer senaryolarda ise, araçların dağıtım planları sabitken sadece yakıt tüketimi, sürücü maaşı gibi parametrelerde değişiklik yapıldığı için oluşmuştur. Örnek problemin optimal çözümünde yer alan toplam maliyete kıyasla %27,51 daha fazla değer alan F2 isimli senaryo en fazla maliyetli senaryo olurken, F1 isimli senaryo ise %27,51 daha düşük değer alarak en az maliyetli senaryo olarak yer almaktadır. CO<sub>2</sub> emisyon salınım göstergesi incelendiğinde ise, Q2 ve C1 isimli senaryolar örnek senaryoya kıyasla %20,78 daha fazla değer alarak salınımın en fazla olduğu senaryolar olarak hesaplanmaktadır. PD2 isimli senaryo ise %20,02 daha düşük değer alarak salınımın en az olduğu senaryo olarak yer almaktadır.



### 4.3. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNE SENARYO ANALİZİ

Lojistik faaliyetlerde çevreci yaklaşımların önemli hale gelmesiyle, sürdürülebilirlik kavramının hem teoride (bkz. Demir ve Van Woensel, 2013; Franceschetti vd., 2013; Soysal vd., 2018; Bektaş vd., 2019) hem de pratikte (bkz. Arkas Lojistik<sup>6</sup>; Safir Lojistik<sup>7</sup>) daha fazla yer almaya başladığı görülmektedir. Yük taşımacılığında elektrik motorlu araçların kullanımı bu amaca yönelik uygulamaya koyulan stratejilerden birisidir (Davis ve Figliozzi, 2013; Pelletier vd., 2014). Bu bölümde, elektrikli araçların kullanıldığı farklı senaryolar ele alınmaktadır.

Bu bölüm kapsamında lojistik ağında seyahat eden araç tipi ve sayısı değiştirilerek dört farklı senaryo oluşturulmuştur. Bu dört farklı senaryo için yakıt maliyetleri ve emisyon değerleri hesaplanmış ve sürdürülebilir yük taşımacılığı açısından karşılaştırılıp analiz edilmiştir.

Bölümde öncelikle oluşturulan dört farklı senaryo açıklanmakta ve oluşturulan senaryoların optimal çözüm sonuçları, araçların dağıtım planları ve emisyon değerleri paylaşılmaktadır. Daha sonra ise, bu değerler birbiriyle karşılaştırılarak maliyetin ve taşımacılık faaliyetleri sonucu ortaya çıkan emisyonun en az olduğu senaryo belirlenmektedir. Son olarak da, elektrik enerjisinin güneş panelleriyle üretildiği bir durum üzerinden karşılaştırılmalı maliyet analizi yapılmaktadır.

#### 4.3.1. Farklı Senaryolar Üzerinden Yakıt Maliyeti ve Emisyon Karşılaştırılması

Bu bölümde dört farklı senaryo incelenmektedir. Tablo 10 incelenen senaryoları, araç tipi, sayıları ve kapasiteleri bilgisi ile birlikte sunmaktadır. Daha önce örnek durum başlığı altında çözülen örnek problem, bu bölümde 1 adet dizel motorlu 1 adet elektrik motorlu aracın olduğu üçüncü senaryo olarak yer almaktadır.

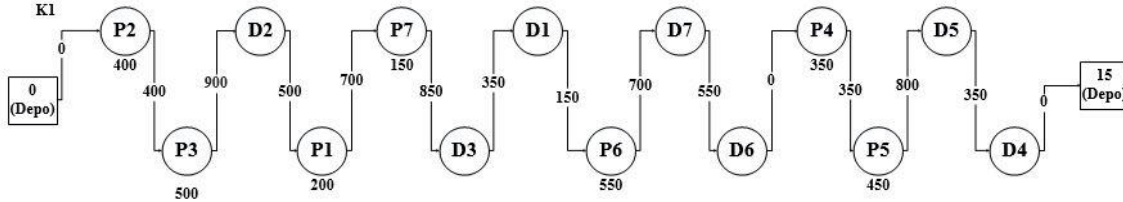
Senaryo	Araç Tipi, Sayıları ve Kapasiteleri
1. Senaryo	1 adet dizel motorlu araç (3650 kg kapasite)
2. Senaryo	2 adet dizel motorlu araç (3650 kg kapasite)
3. Senaryo (Örnek Problem)	1 adet dizel motorlu ve 1 adet elektrik motorlu araç (3650 kg ve 635 kg kapasite)
4. Senaryo	4 adet elektrik motorlu araç (635 kg kapasite)

Tablo 10. Senaryolardaki araç tipi, sayıları ve kapasiteleri

<sup>6</sup> Arkas Lojistik, Erişim tarihi: 15.03.2020, <http://www.arkaslojistik.com.tr/tr-TR/surdurulebilir-lojistik/>

<sup>7</sup> Safir Lojistik, Erişim tarihi: 15.03.2020, <http://www.safirlogistics.com/surdurulebilir-lojistik/>

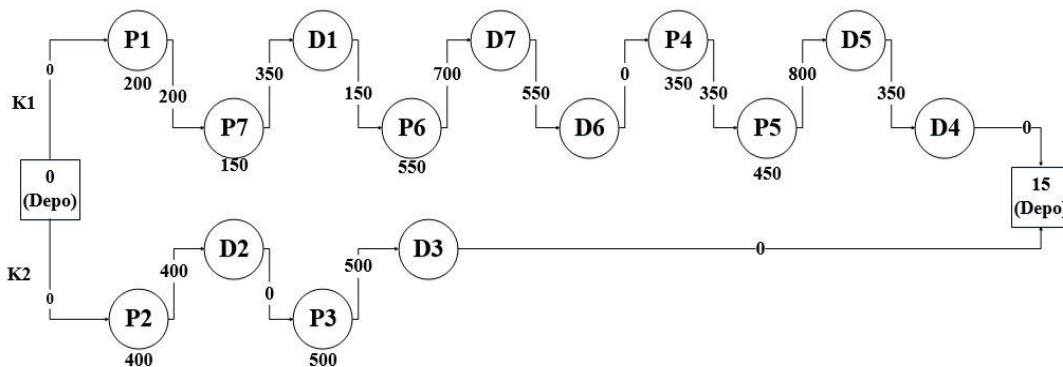
İlk senaryonun çözümü 1 saat 54 dakika sürmüştür. İlgili çözümde, dağıtım faaliyetleri için kullanılan dizel motorlu araç toplamda 689,21 km seyahat etmektedir, böylelikle en iyi çözümde yakıt maliyeti 689,21 TL olarak hesaplanmaktadır. Aracın izlediği rota, noktalar arası taşıdığı yük miktarları Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. K1 (dizel) aracının izlediği rota

Dağıtım faaliyetleri için kullanılan dizel motorlu bu araç 689,21 km seyahat etmiş ve 101,35 litre yakıt tüketmiştir. Sözkonusu dağıtımın yıl içerisinde 250 gün yapılacağı varsayıldığında, toplamda yakıt maliyeti 172302,50 TL<sup>8</sup>, yakıt tüketimi ise 25338,60 litre olarak hesaplanmıştır. Çevreye salınan CO<sub>2</sub> açısından değerlendirme yapmak üzere aracın litre cinsinden yakıt tüketimi yakıt dönüşüm faktörü 2,63 kg/lt<sup>9</sup> ile çarpılarak kg CO<sub>2</sub> emisyon değeri bulunmuştur. Dolayısıyla, araç yılda 250 gün seyahat ederek toplamda 66640,53 kg CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleştirmektedir.

İkinci senaryoda ise dağıtım faaliyetleri için 2 adet dizel motorlu araç kullanılmaktadır. Bu senaryonun optimal çözümünün elde edilmesi yaklaşık 3 saat 18 dakika sürerken, araçlar sırasıyla 395,4 km ve 505,02 km seyahat etmiştir. Böylelikle yakıt maliyeti toplamda 900,42 TL olarak hesaplanmaktadır. Araçların izledikleri rota, noktalar arası taşıdıkları yük miktarları Şekil 12’de gösterilmiştir.



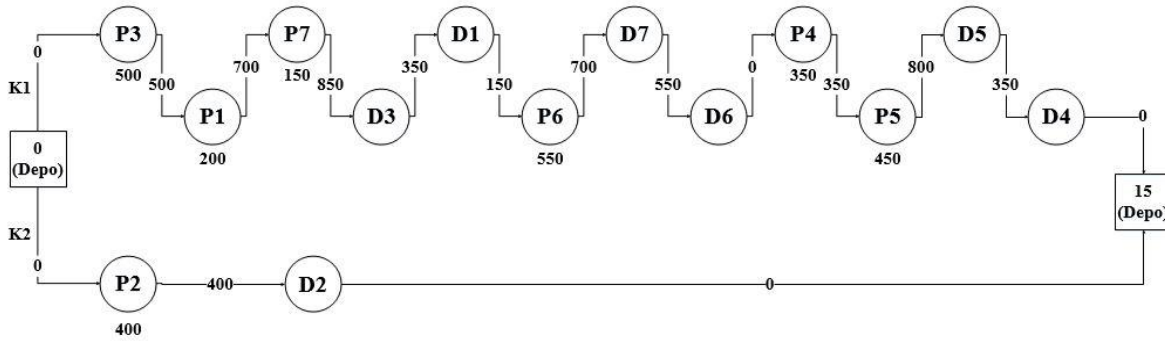
Şekil 12. K1 (dizel) ve K2 (dizel) araçlarının izledikleri rota

<sup>8</sup> 14.02.2020 tarihinde benzinin litre fiyatı 6,8 TL olarak belirtilmiştir, <https://www.opet.com.tr/ankara-akaryakit-fiyatlari>

<sup>9</sup> Yakıt dönüşüm faktörü, <http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/trading/eu/index.htm>

Araçların günlük yakıt tüketimleri sırasıyla 58,14 litre ve 74,26 litre olarak hesaplanmıştır ve toplamda 132,40 litre yakıt harcanmıştır. Yılda 250 gün seyahat etmesi planlanan araçların bu sürede toplamda 225105 TL yakıt maliyet ile 33103,68 litre benzin harcayacağı dolayısıyla 87062,67 kg CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleşeceği hesaplanmıştır. Bir önceki senaryoya kıyasla, dağıtımda bir yerine iki adet aracın kullanılması hem daha maliyetli hem de çevreye verilen zararın hava kirliliği açısından daha fazla olduğu bir durum ortaya çıkarmaktadır.

Üçüncü senaryoda, dağıtım faaliyetleri için bir dizel motorlu araç ve bir elektrik motorlu araç kullanılmaktadır. Optimal çözümün elde edilmesi yaklaşık 1 saat 12 dakika sürmüştür. Bu senaryonun en iyi çözümünde dizel motorlu araç 541,37 km elektrik motorlu araç ise 365,79 km seyahat etmiştir. Yakıt maliyeti ise 550,52 TL olarak hesaplanmıştır. Araçların izledikleri rota ve noktalar arası taşıdıkları yük miktarları Şekil 13'te gösterilmiştir.



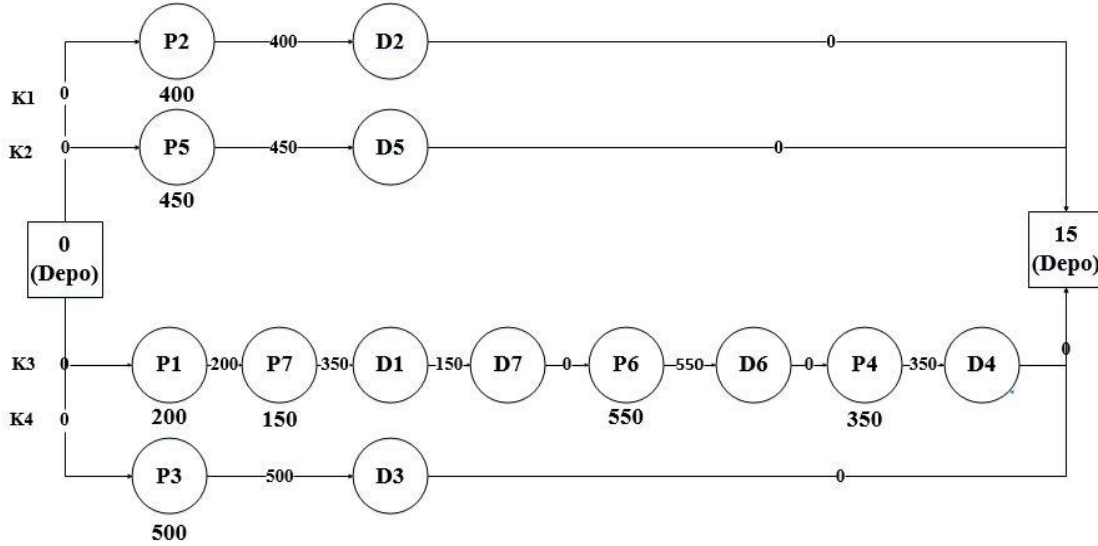
Şekil 13. K1 (dizel) ve K2 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Bu senaryo için yakıt maliyeti 250 gün için toplamda 137630 TL olarak hesaplanmaktadır. Araçların yakıt tüketimleri incelendiğinde, dizel motorlu araç seyahat ettiği 541,37 km yolu 79,61 litre benzin kullanımı ile, elektrik motorlu araç ise 365,79 km yolu 73,15 kWsa elektrik kullanımı ile tamamlamıştır. Oluşturulan dağıtım planında 250 gün seyahat edecek olan dizel motorlu aracın bu sürede 19903,31 litre benzin, elektrik motorlu aracın ise 18289,5 kWsa elektrik harcayacağı hesaplanmıştır. Bu senaryoda dizel motorlu aracın yakıt tüketim değeri yakıt tüketim faktörü 2,63 kg/lit ile çarpılarak, elektrik motorlu aracın yakıt tüketim değeri ise 0,296<sup>10</sup> ile çarpılarak toplamda 57759,39 kg CO<sub>2</sub> salınım gerçekleştireceği hesaplanmıştır.

Son olarak oluşturulan dördüncü senaryoda, dağıtım faaliyetleri için 4 tane elektrik motorlu aracın kullanıldığı durum incelenmektedir. Optimal çözümün elde edilmesi yaklaşık 25 saniye sürmüştür. Araçlar sırasıyla 365,79 km, 274,61 km, 382,84 km ve 355,30 km seyahat etmiştir.

<sup>10</sup> 0,296 değeri elektrik üretiminde kWsa başına ortaya çıkan kg karbon dioksit faktörünün Avrupa Birliği ortalamasıdır (The European Environment Agency, 2016, <https://www.eea.europa.eu>).

Dört araç tarafından toplamda 1378,54 km yol katedilirken yakıt maliyeti de 34,46 TL değer almıştır. Araçların izledikleri rota ve noktalar arası taşıdıkları yük miktarları Şekil 14'te paylaşılmaktadır.



Şekil 14. K1, K2, K3, ve K4 (elektrikli) araçlarının izledikleri rota

Dağıtım faaliyetleri için dört elektrik motorlu aracın kullanıldığı bu senaryo için 250 günlük yakıt maliyeti 8615 TL olarak hesaplanmıştır. Bir günde sırasıyla 73,15 kWsa, 54,92 kWsa, 76,56 kWsa ve 71,06 kWsa elektrik kullanımı ile seyahat eden araçlar toplamda 275,70 kWsa elektrik harcamıştır. Elektrik motorlu araçların 250 günlük yakıt tüketimi böylelikle 68927,2 kWsa olarak hesaplanmaktadır. Daha sonra yakıt tüketimi kWsa başına ortaya çıkan kg karbon dioksit faktörü ile çarpılarak emisyon değeri 20402,45 kg CO<sub>2</sub> olarak hesaplanmıştır.

Senaryoların 250 günde toplam yakıt maliyeti, enerji kullanımı ve emisyon değerleri Tablo 11'de paylaşılmıştır.

Senaryo	Yakıt Maliyeti (TL)	Enerji Kullanımı (Litre/kWsa)	CO <sub>2</sub> Emisyon Değeri (Kg)
1. Senaryo	172302,5	25338,60 lt	66640,53
2. Senaryo	225105	33103,68 lt	87062,67
3. Senaryo	137630	19903,31 lt/ 18289,50 kWsa	57759,39
4. Senaryo	8615	68927,20 kWsa	20402,45

Tablo 11. Toplam yakıt maliyeti, enerji kullanımı ve emisyon değerleri

Sonuç olarak, satın alma maliyeti ve araç bakım maliyetleri göz ardı edildip, sadece yakıt maliyeti kıyaslandığında elektrik motorlu araçların dizel motorlu araçlara kıyasla daha avantajlı olduğu görülmektedir. Oluşturulan bu dört senaryo içinde elektrik motorlu araçların kullanıldığı 4 numaralı senaryoda yakıt maliyeti ve emisyon değerlerinin diğer senaryolara kıyasla daha düşük değerler aldığı görülmektedir.

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

Bir önceki bölümde paylaşılan senaryolarda dağıtım faaliyetlerinde kullanılan elektrik motorlu araçların yakıt maliyetleri elektrik enerjisinin satın alındığı varsayımı üzerinden hesaplanmaktadır. Bu bölümde ise, güneş panelleri kurarak elektrik enerjisinin üretildiği bir durum üzerinden maliyet analizi yapılmaktadır.

Bahsedilen bu durumda gerekli enerji ihtiyacını karşılayacak kadar güneş paneli kurma maliyeti hesaplanmaktadır. Daha sonra elektrik enerjisinin satın alınan durumdaki maliyete kıyasla avantajlı olup olmayacağı tartışılıp güneş panellerinin kurulum maliyeti ve bu yatırımın getiri oranı üzerinden hesaplamalar yapılmaktadır.

4 elektrik motorlu aracın olduğu senaryoyu esas alarak yıllık ihtiyaç olan elektrik enerjisi miktarının ortalama 70000 kWsa olduğu varsayılmıştır (bkz. Tablo 13). Bu üretimi gerçekleştirebilmek için ise, 5 adet 10 kW güneş paneli kurulması ön görülmüştür. Bir adet 10 kW güneş paneli günün güneşli saatine bağlı olarak günde 29-46 kWsa enerji üretmektedir.<sup>11</sup> Hesaplama kolaylığı için bu sayı günde 40 kWsa olarak belirlenmiştir. Böylelikle 1 adet 10 kW güneş paneli yılda 14600 kWsa enerji üretmekte, 5 adet güneş panelinin kurulduğu durumda ise miktar 73000 kWsa olmaktadır.

Amerika Birleşik Devleti'nde vergiler çıkarıldıktan sonra bir adet 10 kW güneş panelinin kurulum maliyeti ortalama olarak 23000 \$ olarak belirtilmiştir.<sup>12</sup> Yukarıda belirtilen gerekli elektrik enerjisinin üretilmesi için ise 5 adet güneş paneli kurulması planlanmakta ve bunun maliyet ise 115000 \$ olmaktadır. Güneş panellerinin bakım maliyeti ise dikkate alınmamıştır. Öte yandan elektrik enerjisinin satın alındığı durumda, Amerika Birleşik Devleti'nde kWsa elektrik enerjisi için birim başına 0,12 \$ ödenmektedir.<sup>13</sup> Bu durumda yılın 250 günü seyahat etmesi planlanan elektrikli araç 70000 kWsa elektrik enerjisi harcayacak ve yıllık 8400 \$

<sup>11</sup> <https://www.solar-estimate.org/solar-panels-101/10kw-solar-system>

<sup>12</sup> <https://www.solar-estimate.org/solar-panels-101/10kw-solar-system#how-much-does-a-10kw-solar-system-cost>

<sup>13</sup> <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/data-and-statistics.php>

yakıt maliyeti ortaya çıkarmaktadır. Yıllık yakıt maliyetinin 8400 \$ olduğunu kabul edip başa baş analizi yapıldığında yaklaşık 13 sene sonra bu yatırımın maliyetinin karşılandığı görülmektedir.

Güneş panellerine yapılan bu yatırımın finansal olarak avantajlı olup olmayacağını öğrenmek amacıyla güneş panellerinin kullanım ömrü, kullanım ömrü boyunca getireceği yıllık getiri miktarı üzerinden hesaplamalar yapılmaktadır. Minimum kabul edilebilir getiri oranı (hurdle rate) bir yatırımla alakalı yönetici veya şirketin, risk ve alternatiflerin fırsat maliyetini göz önünde bulundurarak kabul edeceği minimum getiri oranı olarak tanımlanmakta ve yatırımın dönemlik ne kadar getiri sağlayacağına bakılarak hesaplanmaktadır (Park, 2007 (s. 216)). Çoğu Amerikan şirketi için bu oran %15 ve üstü olarak kabul edilmekte, bu oranın aşağısında getiri sağlayacağı öngörülen yatırımlar ve projeler tercih edilmemektedir (Nahmias ve Olsen, 2015 (s. 627)). 115000 \$ yatırım maliyeti ve elektrik enerjisinin satın alınması yerine üretildiğinde ödenmeyecek olan 8400 \$ yıllık getiri miktarı olarak belirtilmiştir. Güneş panellerinin kullanım ömürlerinin 30, 35 ve 40 sene olduğu varsayılarak, enflasyon ve finansal riskler gibi dış faktörleri dahil etmeden hesaplanan yatırımın iç verim oranı (internal rate of return) ve yıllık indirgenmiş getiri miktarları Tablo 12’de paylaşılmaktadır.

	Yıllar	Güneş panellerinin yaklaşık ömrü		
		30 yıl	35 yıl	40 yıl
İndirgenmiş Getiriler	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	6462,90
	5	6261,98	6131,65	6052,91
	6	5904,70	5757,54	5668,93
	7	5567,81	5406,26	5309,31
	8	5250,14	5076,41	4972,50
	9	4950,59	4766,68	4657,06
	10	4668,14	4475,85	4361,63
	11	4401,80	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	3094,20	2880,67	2756,82

Tablo 12. Güneş panellerinin iç verim oranları ve yıllık indirgenmiş getiri miktarları

	Yıllar	Güneş panellerinin yaklaşık ömrü		
		30 yıl	35 yıl	40 yıl
	18	2917,67	2704,91	2581,93
	19	2751,20	2539,88	2418,14
	20	2594,23	2384,91	2264,74
	21	2446,22	2239,40	2121,07
	22	2306,65	2102,77	1986,52
	23	2175,04	1974,47	1860,50
	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	1255,60
	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			610,60
<b>Toplam Getiri</b>		115000	115000	115000
<b>İç Verim Oranı</b>		%6,05	%6,50	%6,77

Tablo 12 (devamı). Güneş panellerinin iç verim oranları ve yıllık indirgenmiş getiri miktarları

Yıllara göre %6,05, %6,50 ve %6,77 olarak belirlenen iç verim oranları kritik oran olan %15'in altında kaldığı için bu yatırımın finansal olarak avantajlı olmayacağı yorumu yapılmaktadır.

Son olarak, güneş panellerine yapılan bu yatırımın getiri miktarını daha gerçekçi bir şekilde hesaplamak adına, yıllık enflasyon oranını da hesaplamaaya dahil ederek yatırımın iç verim oranı tekrar belirlenmektedir. Amerika Birleşik Devleti'nde son 10 yılın enflasyon oranlarını göz önünde bulundurarak<sup>14</sup>, yıllık enflasyon oranının %1, %2 ve %3 olduğu üç farklı durum üzerinden iç verim oranları tekrar hesaplanmaktadır. Yıllık getiri miktarının enflasyonla birlikte arttığı bu senaryolarda, güneş panellerinin kullanım ömürlerinin yine 30, 35 ve 40 sene olduğu varsayılmaktadır. Yıllık enflasyon oranları ve ona karşılık gelen iç verim oranları Tablo 13'te paylaşılmaktadır.

<sup>14</sup> ABD yıllık enflasyon oranları. Erişim Tarihi: 15.05.2020,  
<https://www.usinflationcalculator.com/inflation/current-inflation-rates/>

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

Tablo 13. Güneş panellerinin farklı enflasyon oranları ile hesaplanmış iç verim oranları

Farklı yıllık enflasyon oranları dahil edilerek farklı yıllara göre hesaplanan iç verim oranlarının %7,02 ve %9,72 arasında değiştiği görülmektedir. Hesaplanan oranların hala kritik oran olan %15'in altında olduğu için yatırım finansal olarak makul görünmemektedir. Fakat bu yatırım ile ilgili yapılan maliyet analizinin küçük bir örnek üzerinde yapıldığını not düşmekte fayda vardır. Örnek problem kapsamında kullanılan veriler ve ortaya çıkan dağıtım planları incelendiğinde sonuçların ve değerlendirmelerin oldukça küçük bir ölçek üzerinden yapıldığı görülmektedir. Daha gerçekçi bir değerlendirme yapmak adına, kısa mesafe yük taşımacılığı alanında hizmet veren bir firmanın daha fazla araç ile daha fazla nokta için hizmet vererek çok daha büyük çaplı bir dağıtım planı oluşturması beklenmektedir. Bunun sonucunda ise, bu bölümde 70000 kWsa olarak varsayılan yıllık enerji ihtiyacı bu rakamdan çok daha fazla olacaktır.

Güneş panellerine yapılan bu yatırımın yıllık getirileri ve yatırımın ölçeği göz önünde bulundurularak daha doğru yorumlar yapılabilir. Ölçeğe göre getiri kavramı, girdi üzerinde yapılan bir değişikliğin çıktı üstündeki etkisi üzerinden yorumlanmaktadır. Girdiler üzerinde gerçekleşen oranlı bir artışın, çıktı üstünde bu orandan daha fazla bir artış ile gerçekleştiğinde, ölçeğe göre getirinin artarak (increasing returns to scale) gerçekleştiği söylenmektedir (Førsund ve Hjalmarsson, 2004). Bu kavram güneş paneli yatırımı üzerinden yorumlandığında, daha fazla elektrik enerjisi üretmek adına kurulan yeni güneş panellerinin, ölçeğin büyümesiyle birlikte getirilerin oransal olarak daha fazla artmasına sebep olacak bu da iç verim oranlarının daha yüksek değerlerde hesaplanmasını sağlayacaktır. Ayrıca daha yüksek miktarda elektrik enerjisi üretilme kararı alınır, ihtiyaçtan arta kalan miktarın başka firmalara satılması ile kazanç sağlanması bir seçenek haline gelecek bu da getirileri artıracaktır.

Yatırımın ekonomik faydasının yanında çevresel faydası göz önünde bulundurulduğunda, elektrik enerjisinin kullanıldığı durumun dizel yakıtların kullanıldığı duruma kıyasla yaklaşık olarak üç kat daha az CO<sub>2</sub> emisyon salınımı ortaya çıkardığı görülmektedir. Gerçek hayatta, kısa mesafe yük taşımacılığı alanında süper market zincirleri ve perakendeciler gibi günlük olarak dağıtım faaliyetleri gerçekleştiren firmaların alternatif enerji kaynaklarını kullanımı ile



emisyen salınımını en aza indirmesi, çevrenin korunumuna büyük ölçüde katkı sağlayacaktır. Bu bilgiler ışığında çevresel katkılar hesaba katıldığında, uzun vadede yatırımın sürdürülebilir yük taşımacılığı açısından faydalı bir uygulama olacağı düşünülmektedir.

## SONUÇ

İkinci dünya savaşından sonra tüm dünyada artan üretim faaliyetleri ekonomik kalkınmaya ve sanayileşmeye olanak sağlamıştır. Günümüzde ise üretim ve enerji kaynaklarının sınırsız olmadığı ve konvansiyonel enerji kaynaklarının kullanımı sonucu çevreye salınan sera gazları ile çevre kirliliğine neden olduğu, küresel ısınmayı hızlandırdığı herkes tarafından kabul edilmektedir. Bunun sonucunda 21. yüzyılda önemli hale gelen sürdürülebilirlik kavramı akademik çevrede de karşılık bulmuş ve uygulanabilir olan her alanda çalışılmaya başlanmıştır. Çevre kirliliğine neden olan sera gazlarının salınımının en fazla olduğu sektörlerden biri olan lojistik, özellikle de yük taşımacılığı bu alanlardan birisidir. Bu yüzden son yıllarda lojistik yönetimi kapsamında ele alınan çeşitli süreçlerde sürdürülebilirlik uygulamaları ve alternatif enerji kullanımı üzerinde araştırmalar yapılmakta ve çevreye verilen zarar azaltılmaya çalışılmaktadır.

Bu çalışmada detaylı olarak ele alınan yük taşımacılığı, literatürde uzun mesafe yük taşımacılığı ve kısa mesafe yük taşımacılığı olarak ikiye ayrılmaktadır. Kısa mesafe yük taşımacılığı başlığı altında incelenen araç rotalama problemlerinde, seyahat kara yolları üzerinde gerçekleştirilmekte ve genelde konvansiyonel araçlar kullanılmaktadır. Bu araçların yakıt tüketimi sonucu ortaya çıkan karbon emisyonunun ise çevre kirliliğine neden olduğu herkes tarafından bilinmektedir. Günümüzde ise, sıfır emisyonla sahip elektrik motorlu araçlar kara yollarında kullanılmaya başlanmıştır. Çevre kirliliğinin, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin büyük ölçüde önüne geçebilecek olan elektrikli araçların kullanımı gün geçtikçe daha büyük kitleler tarafından benimsenmektedir.

Bu çalışmada, araç rotalama problemlerinin bir türü olan bire bir toplama ve dağıtım problemi ele alınmıştır. Literatürde, bire bir toplama ve dağıtım problemi üzerine yeralan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, araç filosunun dizel ve elektrikli araçlardan oluştuğu kabul edilmekte ve Karışık Tam Sayılı Programlama modeli kullanılarak farklı senaryolar üzerinde taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklanan yakıt tüketimi ve emisyon salınımı göstergeleri üzerinden değerlendirmeler yapılmaktadır. Çalışmanın bu yönüyle sürdürülebilir lojistik yönetimi konusuna katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Nümerik analizler çerçevesinde öncelikle bir depo, bir yapay depo, toplama noktaları ve dağıtım noktalarından oluşan örnek bir rotalama problemi çözülmektedir. Sonrasında, problem üzerinde yapılan duyarlılık analizleri ile değişen problem parametrelerinin optimal çözümü ve dağıtım planını ne ölçüde değiştirdiğini görmek amaçlanmıştır. Toplama

noktalarından alınan yük miktarının değiştirildiği Q1 ve Q2, araç kapasitesinin değiştirildiği C1 ve C2 senaryolarında, elektrik motorlu aracın seyahat edebileceği maksimum yolun değiştirildiği R1 ve R2 senaryolarda ve toplama ve dağıtım noktalarının farklı şekilde sıralandığı PD1 ve PD2 senaryolarında örnek problem olarak tanıtılan ana senaryoya göre dağıtım planında değişiklik olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık yakıt maliyetinin değiştirildiği F1 ve F2 senaryolarında, sürücü maaşının değiştirildiği W1 ve W2 senaryolarında örnek problemde yer alan dağıtım planının değişmediği görülmüştür.

Yakıt maliyetinin ve emisyon değerlerinin analiz edilip karşılaştırıldığı sürdürülebilirlik senaryo analizi başlığı altında, kısa mesafe yük taşımacılığında elektrik motorlu araçların kullanımı dikkate alınarak dağıtım planı oluşturulmuştur. Sadece dizel motorlu araçların seyahat ettiği, bir dizel bir elektrik motorlu aracın seyahat ettiği ve tamamen elektrik motorlu araçların seyahat ettiği farklı senaryolar oluşturularak yakıt maliyeti ve emisyon değerleri üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Bu başlık altında detaylı olarak tartışılan senaryolar içinden dört adet elektrik motorlu aracın kullanıldığı senaryo hem en az maliyetli hem de en az karbon salınımının gerçekleştiği senaryo olmuştur. Burdan yola çıkarak kısa mesafelerde elektrikli araçların kullanımının daha düşük maliyet ile daha çevreci sonuçlar vereceği yorumu yapılabilir. Bunun yanında elektrikli araçların satın alma ve bakım maliyetlerinin göz ardı edildiğini not düşmekte fayda bulunmaktadır.

Sürdürülebilirlik senaryo analizi bölümünde, ek olarak ihtiyaç miktarı kadar elektrik enerjisini üretmenin daha az maliyetli olup olmayacağını öğrenmek için güneş paneli kurma maliyeti üzerinden başa baş analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda, bu yatırımın geri dönüşünün ancak 13 yıl sonra alınabileceği görülmektedir. Güneş panellerine yapılan bu yatırımın minimum kabul edilebilir getiri oranı ise ortalama %6 olarak hesaplanmakta ve bu değer oldukça düşük olduğu için yatırımın finansal olarak avantajlı olmadığı görülmektedir. Fakat yatırım daha büyük bir ölçekte gerçekleştiğinde, getiri oranının buna bağlı olarak artacağı düşünülmektedir. Finansal faydanın yanında, elde edilecek olan çevresel fayda göz önünde bulundurulduğunda, güneş panellerine yapılacak olan yatırımın faydalı bir uygulama olacağı sonucuna varılmaktadır.

Bu tez çalışması ve bire bir toplama ve dağıtım problemi özelinde ileride çalışılabilecek, geliştirilebilir konulara bakıldığında, zamana bağımlı araç hızı varsayımı altında araç hızlarının dikkate alınması ile dağıtım faaliyetlerinden kaynaklanan enerji kullanımı ve emisyon salınım miktarının azalabileceği öngörülmektedir. Ayrıca, elektrik motorlu araçların bataryalarının şarj edilebileceği noktalar dikkate alınarak araçların daha uzun kilometreler

seyahat edebileceği dolayısıyla kullanılabilirliğinin artacağı senaryolar üzerinde durulabilir. Bir başka çalışma alanı olarak, yakıt tüketimlerinin daha detaylı olarak ele alınmasına imkan tanıyan yaklaşımlar ilgili matematiksel modellere dahil edilebilir. Bu ve benzeri uygulamalar ile kısa mesafe yük taşımacılığı alanında sürdürülebilir lojistik yönetimi alanına katkı sağlanabileceği düşünölmektedir.

## KAYNAKÇA

- Anily, S. & Hassin, R. (1992). The swapping problem. *Networks*, 22, 419–433.
- Ayadi, M., Chabchoub, H. & 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.
- Azadian, F., Murat, A. & Chinnam, R. B. (2017). An unpaired pickup and delivery problem with time dependent assignment costs: Application in air cargo transportation. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 188-202.
- Bektas, T. (2006). The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, 34(3), 209-219.
- Bektas, T. & Laporte, G. (2011). The pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232-1250.
- Bektas, T., Demir, E. & Laporte, G. (2016). Green vehicle routing. *Green Transportation Logistics*, 243-265.
- Bektas, T., Ehmke, J. F., Psaraftis, H. N. & Puchinger, J. (2018). The role of operational research in green freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 274(3), 807-823.
- Bent, R. & Van Hentenryck, P. (2006). A two-stage hybrid algorithm for pickup and delivery vehicle routing problems with time windows. *Computers and Operations Research*, 33(4).
- Berbeglia, G., Cordeau, J. F., Gribkovskaia, I. & Laporte, G. (2007). Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *TOP*, 15(1), 1-31.
- Bianchessi, N. & Righini, G. (2007). Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery. *Computers & Operations Research*, 34(2), 578-594.
- Bloemhof-Ruwaard, J. M. & Soysal, M. (2017). Sustainable food supply chain design. *Sustainable Supply Chains* (395-412). Springer.
- Caramia, M. & Guerriero, F. (2010). A milk collection problem with incompatibility constraints. *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 40(2). 105-173.

- Chalasan, P. & Motwani, R. (1999). Approximated capacitated routing and delivery problems. *SIAM Journal on Computing*, 28(6), 21-33.
- Chopra, S. & Meindl P. (2013). *Supply Chain Management Strategy, Planning and Operation* (500-509). New Jersey: Prentice Hall.
- Cordeau, J. F., Laporte, G. & Mercier, A. (2000). Unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 52(8), 928-936.
- Cordeau, J. F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J. Y. & Semet, F. (2002). A guide to vehicle routing heuristics . *Journal of the Operational Research Society*, 53(5), 512-522.
- Cordeau, J.F. & Laporte, G. (2003a). The dial-a-ride problem (DARP): variants, modeling issues and algorithms. *4OR Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies*, 1(2), 89-101.
- Cordeau, J. F. & Laporte, G. (2003b). A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem. *Transportation Research Part B Methodological*, 37(6), 579-594.
- Cordeau, J. F. (2006). A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem. *Operations Research*, 54(3), 573-586.
- Cordeau, J. F., Laporte, G. & 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). Boston, MA: Springer.
- Cordeau, J. F., Iori, M., Laporte, G. & Salazar-Gonzalez J. J. (2010). A branch-and-cut algorithm for the pickup and delivery traveling salesman problem with LIFO loading. *Networks*, 55(1), 46-59.
- Crainic, T.G. (2000). Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 122, 272-288.
- Davis, B. A. & Figliozzi, M. A. (2013). A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 8-23.

- Dell'Amico, M., Righini, G. & Salani, M. (2006). A branch-and-price approach to the vehicle routing problem with simultaneous distribution and collection. *Transportation Science*, 40(2), 235-247.
- Demir, E., Bektas, T. & Laporte, G. (2011). A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, 16(5), 347-357.
- Demir, E., Bektas, T. & Laporte, G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 346-359.
- Demir, E. & van Woensel, T. (2013). Mathematical Modeling of CO<sub>2</sub> Emissions in One-to-one Pickup and Delivery Problems. *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 63-67.
- Desaulniers, G., Desrosiers, J., Erdmann, A., Solomon, M. M. & Soumis, F. (2002). VRP with Pickup and Delivery. *The Vehicle Routing Problem* (225-242). SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics).
- Dethloff, J. (2001). Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up. *OR Spektrum*, 23, 79-96.
- Dumas, Y., Desrosiers, J. & Soumis, F. (1991). The pickup and delivery problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 54(1), 7-22.
- Dumitrescu, I., Ropke, S., Cordeau, J. F. & 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.
- Factorovich, P., Méndez-Díaz, I. & Zabala, P. (2020). Pickup and delivery problem with incompatibility constraints. *Computers & Operations Research*, 113.
- Feng, W. & Figliozzi, M. A. (2013). An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, 135-145.
- Forkenbrock, D.J. (1999). External costs of intercity truck freight transportation. *Transportation Research Part A*, 33, 505-526.

- Forkenbrock, D.J. (2001). Comparison of external costs of rail and truck freight transportation. *Transportation Research Part A*, 35, 321-337.
- Førsund, F. & 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. & Laporte, G. (2013). The time-dependent pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 56(C), 265-293.
- Gendreau, M., Hertz, A. & Laporte, G. (1996). The traveling salesman problem with backhauls. *Computers & Operations Research*, 23(5), 501-508.
- Gendreau, M. & Potvin, J. Y. (1998). Dynamic Vehicle Routing and Dispatching. *Fleet Management and Logistics* (115-126). Boston, MA: Springer.
- Ghiani, G., Laporte, G., & Musmanno, R. (2004). Planning and Managing Long-Haul Freight Transportation. *Introduction to Logistics Systems Planning and Control*. (199-245). West Sussex, İngiltere: John Wiley & Sons.
- Ghiani, G., Laporte, G., & Musmanno, R. (2004). Planning and Managing Short-Haul Freight Transportation. *Introduction to Logistics Systems Planning and Control*. (247-298). West Sussex, İngiltere: John Wiley & Sons.
- Gribkovskaia, I., Halskau, Ø., Laporte, G. & Vlcek, M. (2007). General solutions to the single vehicle routing problem with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 180(2), 568-584.
- Gribkovskaia, I. & Laporte, G. (2008). One-to-many-to-one single vehicle pickup and delivery problems. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges* (359-377). Boston, MA: Springer.
- Guerriero, F., Pezzella, F., Pisacane, O. & Trollini, L. (2014). Multi objective optimization in dial-a-ride public transportation. *Transportation Research Procedia*, 3, 299 – 308.
- Guo, J. & Liu, C. (2017). Time-Dependent Vehicle Routing of Free Pickup and Delivery Service in Flight Ticket Sales Companies Based on Carbon Emissions. *Journal of Advanced Transportation*, 2017, 1-14.



- Haddad, M. N., Martinelli, R., Vidal, T. ve diğerleri. (2018). Large neighborhood-based metaheuristic and branch-and-price for the pickup and delivery problem with split loads. *European Journal of Operational Research*, 270(3), 1014-1027.
- Henke, T., Speranza, M. G. & Wäscher, G. (2019). A branch-and-cut algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes. *Annals of Operations Research*, 275, 321-338.
- Hernandez-Perez, H. & Salazar-Gonzalez, J. J. (2004). Heuristics for the one-commodity pickup-and-delivery traveling salesman problem. *Transportation Science*, 38(2), 121-255.
- Iori, M. & Riera-Ledesma, J. (2015). Exact algorithms for the double vehicle routing problem with multiple stacks. *Computers & Operations Research*, 63, 83-101.
- Jabali, O., van Woensel, T. & de Kok, A. G. (2012). Analysis of Travel Times and CO<sub>2</sub> Emissions in Time-Dependent Vehicle Routing. *Production and Operations Management*, 21(6), 1060-1074.
- Kalantari, B., Hill, A. V. & Arora, S. R. (1985). An algorithm for the traveling salesman problem with pickup and delivery customers. *European Journal of Operational Research*, 22(3), 377-386.
- Lahyani, R., Coelho, L. C., Khemakhem, M., Laporte, G. & Semet, F. (2015). A multi compartment vehicle routing problem arising in the collection of olive oil in Tunisia. *Omega*, 51, 1-10.
- Laporte, G., Nobert, Y. & Desrochers, M. (1985). Optimal routing under capacity and distance restrictions. *Operations Research*, 33(5), 1050-1073.
- Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345-358.
- Li, X. (2014). Operations Management of Logistics and Supply Chain: Issues and Directions. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014, 1-7.
- Mahmoudi, M. & Zhou, X. (2016). Finding optimal solutions for vehicle routing problem with pickup and delivery services with time windows: A dynamic programming approach based on state-space-time network representations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 89, 19-42.

- Mesa-Arango, R. & 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.
- Mitrovic-Minic, S. & Laporte, G. (2004). Waiting strategies for the dynamic pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(7), 635-655.
- Mitrovic-Minic, S. & Laporte, G. (2006). The pickup and delivery problem with time windows and transshipment. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 44(3), 217-227.
- Montero, A., Miranda-Bront, J. J. & 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.
- Nahmias, S. & Olsen, T. L. (2015). *Production and Operations Analysis*, 627. Illinois: Waveland Press.
- Oncan, T., Tuzun Aksu, D., Sahin, G. & Sahin, 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, C. S. (2007). *Contemporary Engineering Economics*, 216. New Jersey: Prentice Hall.
- Pankratz, G. (2005). A grouping genetic algorithm for the pickup and delivery problem with time windows. *OR Spectrum*, 27, 21-41.
- Pelletier, S., Jabali, O. & Laporte, G. (2014). Goods Distribution with Electric Vehicles: Review and Research Perspectives.
- Pelletier, S., Jabali, O., Laporte, G. & Veneroni, M. (2017). Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 103(C), 158-187.
- Pelletier, S., Jabali, O. & Laporte, G. (2018). Charge scheduling for electric freight vehicle. *Transportation Research Part B: Methodological*, 115(C), 246-269.

- Pisinger, D. & Ropke, S. (2007). A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, 34(8), 2403-2435.
- Plum, C., Pisinger, D., Salazar-Gonzalez, J.J., & Sigurd, M. (2012). The Multi-commodity One-to-one Pickup-and-delivery Traveling Salesman Problem with Path Duration Limits. *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, 2012* (2), 1578-1581.
- Ropke, S. & Pisinger, D. (2005). An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *Transportation Science*, 40, 455-472.
- Ropke, S., Cordeau, J. F. & Laporte, G. (2007). Models and branch-and-cut algorithms for pickup and delivery problems with time windows. *Networks*, 49(4), 258-272.
- Ropke, S. & Cordeau, J. F. (2009). Branch-and-cut-and-price for the pick up and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, 43(3), 267-286.
- Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2010). *The handbook of Logistics Distribution Management*, (585-604). Londra: Kogan Page Limited.
- Sahin, M., Cavuslar, G., Oncan, T. ve diğ erleri. (2013). An efficient heuristic for the Multi-vehicle One-to-one Pickup and Delivery Problem with Split Loads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 27, 169-188.
- Savelsbergh, M. & Sol, M. (1995). The General Pickup and Delivery Problem. *Transportation Science*, 29(1), 17-29.
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 35(2), 254-265.
- Soysal, M., & Bloemhof-Ruwaard, J. M. (2017). Toward sustainable logistics. *Sustainable logistics and transportation: optimization models and algorithms* (1-17). Springer.
- Soysal, M., Cimen, M. & 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.
- Soysal, M., Çimen, M., Belbağ, S. & Toğrul, E. (2019). A review on sustainable inventory routing. *Computers & Industrial Engineering*, 132, 395-411.

Soysal, M., Cimen, M. & Belbağ, S. (2020). Pickup and delivery with electric vehicles under stochastic battery depletion. *Computers & Industrial Engineering*.

Taefi, T. T., Kreutzfeldt, J., Held, T. & 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.

Talebian, H., Herrera, O. E., Tran, M. & Mérida, W. (2018). Electrification of road freight transport: Policy implications in British Columbia. *Energy Policy*, 115(C), 109-118.

Tong, F., Jaramillo, P. & Azevedo, I. M. (2015). Comparison of Life Cycle Greenhouse Gases from Natural Gas Pathways for Medium and Heavy-Duty Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 49(12), 7123-7133.

Treleven, K., Pavone, M. & 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.

World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.

Xu, B. & Lin, B. (2015). Factors affecting carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions in China's transport sector: a dynamic nonparametric additive regression model. *Journal of Cleaner Production*, 101, 311-322.

Zhu, X., Garcia-Diaz, A., Jin, M. & Zhang, Y. (2014). Vehicle fuel consumption minimization in routing over-dimensioned and overweight trucks in capacitated transportation networks. *Journal of Cleaner Production*, 85, 331-336.

## EK 1. TEZ KAPSAMININDA ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODELİN KODU

```
{int} P = ...;
{int} D = ...;
{int} V = ...;
{int} Vfarkartificial = ...;
int artificial = ...;
```

```
    tuple Arc {
        int i;
    int j;
    }
    {Arc} Arcs = ...;
```

```
{int} K = ...;
```

```
float q[P] = ...;
float Q[K] = ...;
float t[Arcs] = ...;
float h[V] = ...;
int M = 1000000;
float f[K] = ...;
float R[K] = ...;
float d[Arcs] = ...;
float wage = ...;
int n = ...;
```

```
dvar boolean X[Arcs][K];
dvar float+ Y[Vfarkartificial][K];
dvar float+ F[Arcs][K];
dvar float+ S[D][K];
```

```
dexpr float traveleddistace[k in K] = sum(a in Arcs) X[a][k] * d[a];
dexpr float wagecost = sum(k in K,j in D) S[j][k] * wage;
dexpr float fuelcost = sum(k in K, a in Arcs) X[a][k] * d[a] * f[k];
```

minimize

wagecost + fuelcost;

subject to

```
{
forall(i in P){
sum(k in K,j in V: <i,j> in Arcs) X[<i,j>][k] == 1;
}
}
```

```

forall(k in K){
sum(i in P) X[<0,i>][k] == 1;
sum(i in D) X[<i,2*n+1>][k] == 1;
}

forall(i in P, k in K){
sum(j in V: <i,j> in Arcs) X[<i,j>][k] - sum(j in V: <n+i,j> in Arcs) X[<n+i,j>][k] == 0;
}

forall(i in P union D, k in K){
sum(j in V: <j,i> in Arcs) X[<j,i>][k] - sum(j in V: <i,j> in Arcs) X[<i,j>][k] == 0;
}

forall(i in P, k in K){
    Y[i][k] <= Y[i+n][k];
}

forall(i in P){
    sum(j in V: <j,i> in Arcs, k in K) F[<j,i>][k] - sum(j in V: <i,j> in Arcs, k in K)
F[<i,j>][k] == -q[i];
}

forall(i in D){
    sum(j in V: <j,i> in Arcs, k in K) F[<j,i>][k] - sum(j in V: <i,j> in Arcs, k in K)
F[<i,j>][k] == q[i-n];
}

forall(a in Arcs, k in K){
    F[a][k] - Q[k] * X[a][k] <= 0;
}

sum(k in K, i in P) F[<0,i>][k] == 0;

forall(k in K, a in Arcs: a.j != artificial){
    Y[a.i][k] - Y[a.j][k] + h[a.i] + t[a] <= M * (1 - X[a][k]);
}

forall(j in D, k in K){
    Y[j][k] + h[j] - S[j][k] + t[<j,artificial>] <= M * (1 - X[<j,artificial>][k]);
}

forall(k in K){
    traveleddistance[k] <= R[k];
}

}

```

**EK 2. GÜNEŞ PANELİ YATIRIMININ YILLIK ENFLASYON ORANI DAHİL EDİLEREK HESAPLANAN  
GETİRİLERİNİN GELECEK DEĞERLERİ**

	Yıllar	30	35	40	30	35	40	30	35	40
	Enflasyon Oranı	1%			2%			3%		
	Yatırım Maliyeti	-115000	-115000	-115000	-115000	-115000	-115000	-115000	-115000	-115000
Getirilerin Gelecek Değerleri	<b>1</b>	8400	8400	8400	8400	8400	8400	8400	8400	8400
	<b>2</b>	8484	8484	8484	8568	8568	8568	8652	8652	8652
	<b>3</b>	8568,84	8568,84	8568,84	8739,36	8739,36	8739,36	8911,56	8911,56	8911,56
	<b>4</b>	8654,53	8654,53	8654,53	8914,15	8914,15	8914,15	9178,91	9178,91	9178,91
	<b>5</b>	8741,07	8741,07	8741,07	9092,43	9092,43	9092,43	9454,27	9454,27	9454,27
	<b>6</b>	8828,48	8828,48	8828,48	9274,28	9274,28	9274,28	9737,90	9737,90	9737,90
	<b>7</b>	8916,77	8916,77	8916,77	9459,76	9459,76	9459,76	10030,04	10030,04	10030,04
	<b>8</b>	9005,94	9005,94	9005,94	9648,96	9648,96	9648,96	10330,94	10330,94	10330,94
	<b>9</b>	9096,00	9096,00	9096,00	9841,94	9841,94	9841,94	10640,87	10640,87	10640,87
	<b>10</b>	9186,96	9186,96	9186,96	10038,78	10038,78	10038,78	10960,09	10960,09	10960,09
	<b>11</b>	9278,83	9278,83	9278,83	10239,55	10239,55	10239,55	11288,90	11288,90	11288,90
	<b>12</b>	9371,61	9371,61	9371,61	10444,34	10444,34	10444,34	11627,56	11627,56	11627,56
	<b>13</b>	9465,33	9465,33	9465,33	10653,23	10653,23	10653,23	11976,39	11976,39	11976,39
	<b>14</b>	9559,98	9559,98	9559,98	10866,30	10866,30	10866,30	12335,68	12335,68	12335,68
	<b>15</b>	9655,58	9655,58	9655,58	11083,62	11083,62	11083,62	12705,75	12705,75	12705,75
	<b>16</b>	9752,14	9752,14	9752,14	11305,29	11305,29	11305,29	13086,93	13086,93	13086,93
	<b>17</b>	9849,66	9849,66	9849,66	11531,40	11531,40	11531,40	13479,53	13479,53	13479,53
	<b>18</b>	9948,16	9948,16	9948,16	11762,03	11762,03	11762,03	13883,92	13883,92	13883,92

Yıllar	30	35	40	30	35	40	30	35	40
Enflasyon Oranı	1%			2%			3%		
Yatırım Maliyeti	-115000	-115000	-115000	-115000	-115000	-115000	-115000	-115000	-115000
19	10047,64	10047,64	10047,64	11997,27	11997,27	11997,27	14300,44	14300,44	14300,44
20	10148,12	10148,12	10148,12	12237,21	12237,21	12237,21	14729,45	14729,45	14729,45
21	10249,60	10249,60	10249,60	12481,96	12481,96	12481,96	15171,33	15171,33	15171,33
22	10352,09	10352,09	10352,09	12731,60	12731,60	12731,60	15626,47	15626,47	15626,47
23	10455,61	10455,61	10455,61	12986,23	12986,23	12986,23	16095,27	16095,27	16095,27
24	10560,17	10560,17	10560,17	13245,95	13245,95	13245,95	16578,13	16578,13	16578,13
25	10665,77	10665,77	10665,77	13510,87	13510,87	13510,87	17075,47	17075,47	17075,47
26	10772,43	10772,43	10772,43	13781,09	13781,09	13781,09	17587,73	17587,73	17587,73
27	10880,15	10880,15	10880,15	14056,71	14056,71	14056,71	18115,37	18115,37	18115,37
28	10988,95	10988,95	10988,95	14337,85	14337,85	14337,85	18658,83	18658,83	18658,83
29	11098,84	11098,84	11098,84	14624,60	14624,60	14624,60	19218,59	19218,59	19218,59
30	11209,83	11209,83	11209,83	14917,10	14917,10	14917,10	19795,15	19795,15	19795,15
31		11321,93	11321,93		15215,44	15215,44		20389,00	20389,00
32		11435,15	11435,15		15519,75	15519,75		21000,67	21000,67
33		11549,50	11549,50		15830,14	15830,14		21630,70	21630,70
34		11665,00	11665,00		16146,74	16146,74		22279,62	22279,62
35		11781,65	11781,65		16469,68	16469,68		22948,00	22948,00
36			11899,46			16799,07			23636,44
37			12018,46			17135,05			24345,54
38			12138,64			17477,75			25075,90
39			12260,03			17827,31			25828,18
40			12382,63			18183,86			26603,03



### EK 3. GÜNEŞ PANELİ YATIRIMININ YILLIK ENFLASYON ORANI DAHİL EDİLEREK HESAPLANAN İNDİRGENMİŞ GETİRİ MİKTARLARI

	Yıllar	30	35	40	30	35	40	30	35	40
	<b>İç Verim Oranı</b>	7,02%	7,47%	7,76%	7,98%	8,45%	8,74%	8,95%	9,43%	9,72%
	<b>Enflasyon Oranı</b>	1%			2%			3%		
İndirgenmiş Getiriler	<b>1</b>	7849,20	7815,83	7795,36	7778,97	7745,49	7724,90	7710,01	7676,42	7655,73
	<b>2</b>	7407,86	7345,02	7306,58	7347,93	7284,82	7246,14	7289,00	7225,63	7186,72
	<b>3</b>	6991,34	6902,56	6848,45	6940,78	6851,54	6797,06	6890,98	6801,30	6746,45
	<b>4</b>	6598,24	6486,76	6419,05	6556,18	6444,04	6375,80	6514,69	6401,90	6333,15
	<b>5</b>	6227,24	6096,00	6016,56	6192,90	6060,77	5980,65	6158,95	6025,95	5945,17
	<b>6</b>	5877,10	5728,78	5639,32	5849,75	5700,30	5610,00	5822,64	5672,08	5580,96
	<b>7</b>	5546,65	5383,69	5285,73	5525,61	5361,26	5262,31	5504,69	5338,99	5239,06
	<b>8</b>	5234,78	5059,38	4954,31	5219,43	5042,40	4936,17	5204,10	5025,46	4918,10
	<b>9</b>	4940,44	4754,61	4643,67	4930,22	4742,49	4630,25	4919,93	4730,34	4616,81
	<b>10</b>	4662,66	4468,20	4352,50	4657,03	4460,43	4343,28	4651,27	4452,55	4333,98
	<b>11</b>	4400,49	4199,04	4079,60	4398,98	4195,14	4074,10	4397,29	4191,08	4068,47
	<b>12</b>	4153,06	3946,09	3823,80	4155,23	3945,63	3821,61	4157,17	3944,96	3819,23
	<b>13</b>	3919,55	3708,38	3584,05	3924,99	3710,95	3584,76	3930,17	3713,29	3585,25
	<b>14</b>	3699,16	3484,99	3359,32	3707,50	3490,24	3362,59	3715,56	3495,23	3365,61
	<b>15</b>	3491,17	3275,06	3148,69	3502,06	3282,65	3154,19	3512,67	3289,97	3159,43
	<b>16</b>	3294,87	3077,77	2951,26	3308,01	3087,41	2958,71	3320,85	3096,77	2965,88
	<b>17</b>	3109,61	2892,37	2766,22	3124,71	2903,79	2775,34	3139,52	2914,91	2784,18
	<b>18</b>	2934,77	2718,14	2592,77	2951,57	2731,08	2603,33	2968,08	2743,74	2613,62
	<b>19</b>	2769,75	2554,40	2430,20	2788,02	2568,64	2441,99	2806,01	2582,61	2453,50
	<b>20</b>	2614,02	2400,53	2277,83	2633,54	2415,87	2290,64	2652,78	2430,95	2303,20
	<b>21</b>	2467,04	2255,92	2135,00	2487,61	2272,18	2148,68	2507,93	2288,19	2162,10

