



**ENTEĞRE ATIK YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN ALTERNATİF TAŞIMA  
YÖNTEMLERİ**

**FATİH KAMAĞLU**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nesli AYDIN  
2022**

**T.C.**  
**TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**ENTEĞRE ATIK YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN ALTERNATİF TAŞIMA  
YÖNTEMLERİ**

**FATİH KAMAĞLU**

**ORCID: 0000-0002-4712-1729**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nesli AYDIN**

**HAZİRAN-2022**

**Her hakkı saklıdır.**

## ÖZET

### ENTEĞRE ATIK YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN ALTERNATİF TAŞIMA YÖNTEMLERİ

Fatih KAMAOĞLU

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nesli AYDIN

Atıkların en az maliyet ve çevresel yük ile yönetimi son zamanlarda döngüsel ekonomi açısından önem kazanmıştır. Bu çalışmada, atıkların demiryolu ve karayolu ile taşınmasına ilişkin alternatifler tanımlanarak, bu alternatiflerin, çok ölçütlü karar verme kapsamında, maliyet, çevre ve sosyal ölçütler kullanılarak karşılaştırılması, Right Choice (2.0) karar verme model yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Model için gerekli veriler anket ve kaynak taraması ile elde edilmiştir. Bu kapsamda, atık taşımacılığının karayolu ile yapılması, Alternatif 1 ile gösterilirken, demiryolu ile yapılması, Alternatif 2 (dorse ve çekici ile birlikte), Alternatif 3 (sadece dorse) ve Alternatif 4 (sadece atık) ile temsil edilmiştir. Sonuç olarak, Alternatif 4 ile belirtilen atık transferinin sadece atıkların vagonlara yüklenerek (çekici ve dorse kullanılmadan) yapılması optimum seçenek olarak belirlenmiştir. Buna göre, Alternatif 4'ün işletme-bakım maliyetinin düşük olması, bir diğer deyişle bu ölçüt üzerinde yüksek performans göstermesi ve işletme-bakım maliyeti ölçütünün paydaşlar tarafından yüksek göreceli önem ile derecelendirilmesi rol oynamaktadır. Aynı şekilde, Alternatif 4 için gerekli personel sayısı diğer alternatiflere göre düşüktür. Demiryolu taşımacılığı ile taşımada atıkların bekleme süresi ve operasyonel iş yüküne duyulan ihtiyaç önemli ölçüde azalmaktadır. 1000 ton atığın karayolu üzerinden transferinin yapılması yaklaşık 50 tır (50 ayrı sefer) ile sağlanırken, demiryolu için 2 (atıkların çekici ve/veya dorse ile taşınması durumunda) ya da 3 (sadece atıkların taşınması durumunda) trene ihtiyaç olmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Atık yönetimi, Çevresel yük, Döngüsel ekonomi, Karar verme modeli, Maliyet

## ABSTRACT

### ALTERNATIVE TRANSPORT METHODS FOR INTEGRATED WASTE MANAGEMENT SYSTEMS

Fatih KAMAÖĐLU

Department of Environmental Engineering

Master Thesis

Supervisor: Assist. Prof Dr. Nesli AYDIN

The management of wastes with minimum cost and environmental burden has recently gained importance in terms of circular economy. In this study, alternatives for the transportation of wastes by rail and road were defined and the comparison of these alternatives using cost, environmental and social criteria within the scope of multi-criteria decision making was determined using the Right Choice (2.0) decision making model software. The necessary data for the model were obtained by questionnaire and literature review. In this context, the transportation of waste by road is shown with Alternative 1, while the transportation by rail is represented by Alternative 2 (with truck and trailer), Alternative 3 (trailer only) and Alternative 4 (waste only). As a result, it was determined that the optimum option to transfer the wastes specified in Alternative 4, only by loading the wastes on the wagons (without the use of truck and trailers). Accordingly, the low operation-maintenance cost of Alternative 4, in other words, its high performance on this criterion and the high relative importance of the operation-maintenance cost criterion by the stakeholders play a role. Likewise, the number of personnel required for Alternative 4 is low compared to other alternatives. With rail transport, the waiting time of wastes and the need for operational workload are significantly reduced. While the transfer of 1000 tons of waste over the road is provided by approximately 50 trucks (50 separate voyages), 2 trains (in case of transporting wastes with truck and/or trailer) or 3 trains (only transporting of wastes) are needed for the railway.

**Keywords:** Environmental burden, Circular economy, Cost, Decision making model, Waste management

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER DİZİNİ .....	vii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
TEŞEKKÜR.....	ix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Özeti .....	2
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	5
<b>2. KARAYOLU VE DEMİRYOLU TAŞIMACILIĞININ KARŞILAŞTIRILMASI..7</b>	<b>7</b>
2.1 Karayolu Yatırım Maliyeti ve Enerji Gereksinimi .....	8
2.2 Demiryolu Yatırım Maliyeti ve Enerji Gereksinimi .....	9
2.3 Taşımacılıkta Personel İhtiyacı.....	10
<b>3. DEMİRYOLU İLE ATIK TAŞIMACILIĞI.....</b>	<b>11</b>
3.1 Çekici ve Dorsenin Trene Yüklenmesi .....	12
3.2 Sadece Dorsenin Trene Yüklenmesi .....	12
3.3 Atığın Direkt Tren Vagonlarına Yüklenmesi.....	13
<b>4. MATERYAL YÖNTEM .....</b>	<b>14</b>
4.1 Karar Ağacı.....	14
4.2 Alternatiflerin Belirlenmesi .....	15
4.2.1 Alternatif 1 .....	16
4.2.2 Alternatif 2 .....	16
4.2.3 Alternatif 3 .....	17
4.2.4 Alternatif 4 .....	18

4.3 Ölçüt Performanslarının Elde Edilmesi .....	19
4.4 Göreceli Önem Değerlendirmesi .....	22
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>24</b>
5.1 Senaryoların Ölçüt Performansları.....	24
5.2 Göreceli Önem Derecelendirmesi.....	25
5.3 Sınır Analizi .....	25
5.4 Duyarlılık Analizi .....	28
5.5 Tartışma ve Sonuç.....	31
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>33</b>
<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ ESERLER.....</b>	<b>39</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Atık yönetiminde kullanılan modeller ve detayları.....	3
Çizelge 3.1. Vagon özellikleri .....	12
Çizelge 4.1. Alternatif 1 için hesaplamalar .....	16
Çizelge 4.2. Alternatif 2 için hesaplamalar .....	17
Çizelge 4.3. Alternatif 3 için hesaplamalar .....	18
Çizelge 4.4. Alternatif 4 için hesaplamalar .....	19
Çizelge 4.5. Hesaplamalarda kullanılan veriler.....	20
Çizelge 4.6. Atık taşımacılığında personel ihtiyacı.....	21
Çizelge 4.7. Anket .....	22
Çizelge 5.1. Çevre performansı .....	24
Çizelge 5.2. Personel ihtiyacı performansı.....	24
Çizelge 5.3. Maliyet performansı .....	25

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Çekici görseli.....	7
Şekil 2.2. Dorse görseli .....	8
Şekil 3.1. R tipi platform vagon .....	11
Şekil 3.2. U tipi uagoos-w tipi tahıl vagonu .....	11
Şekil 3.3. Çekici ve dorsenin trene yüklenmiş hali .....	12
Şekil 3.4. Sadece dorsenin trene yüklenmiş hali .....	13
Şekil 3.5. Atıkların direkt olarak vagona yüklenmiş hali .....	13
Şekil 4.1. Atık transferi karar ağacı.....	15
Şekil 5.1. Modelde göreceli önem değerleri.....	26
Şekil 5.2. Modelde atık taşıma alternatiflerinin tanımlanması.....	26
Şekil 5.3. Alternatiflerin ölçütler üzerindeki performans değerlerinin tanımlanması.....	27
Şekil 5.4. Sınır Analiz Sonuçları .....	28
Şekil 5.5. Çevre ölçütünün duyarlılık analizi .....	28
Şekil 5.6. Personel ihtiyacı ölçütünün duyarlılık analizi.....	30
Şekil 5.7. Maliyet ölçütünün duyarlılık analizi .....	30



## SİMGELER DİZİNİ

CO <sub>2</sub> -eş	CO <sub>2</sub> eşdeğer
%	Yüzde işareti
L	Litre



## **KISALTMALAR DİZİNİ**

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BG	Beygir Gücü
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
Kg	Kilogram
Km	Kilometre
kW	Kilowat
kWsa	Kilowat saat
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları



## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, ülkemizde taşıma alanındaki alternatiflerin atık taşımacılığında kullanılmasına entegre edilmesi hususunda katkı sağlayacaktır. Bu çalışmaya başlamamda emeği olan, teze ilk başladığım dönemde vefat haberini alman sebebiyle derin üzüntü duyduğum Sayın Doç. Dr. Esra TINMAZ KÖSE hocama borçluyum. Kendisini saygı ve minnetle anıyorum. Tez dönemimde kaldığım yerden devam etmemi sağlayan, bilgilerini benimle paylaşan ve her konuda destek olan danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nesli AYDIN hocama tezimi konu değiştirmeden yarım kalan çalışma üzerine sağlamış olduğu büyük katkılarından dolayı hocama teşekkürlerimi sunarım. Çalışma arkadaşlarım, Saffet ALTINDAĞ, Filiz KARA ve Mustafa Selman ÖNDER'e bana vermiş oldukları desteklerden ötürü teşekkürlerimi sunarım. Bu yaşıma kadar maddi manevi destekçim olan annem Hülya KAMAOĞLU, babam Necmettin KAMAOĞLU, kardeşim Melih KAMAOĞLU ve değerli hayat arkadaşım Derya KAMAOĞLU başta olmak üzere, tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Fatih KAMAOĞLU

Çevre Mühendisi

## 1. GİRİŞ

Katı atıklar, insan hayatını doğrudan tehdit eden önemli bir çevre problemi oluşturma potansiyeline sahiptir. Diğer tüm çevre problemlerinde olduğu gibi, artan nüfus ve tüketimle paralel giden katı atık üretimindeki artış, büyük bir endişe kaynağı haline gelmektedir. Bu kapsamda, katı atık toplama ve taşıma faaliyetlerinin organizasyonu ve yönetiminin önemi gün geçtikçe artmaktadır.

Demiryolu taşımacılığının, karayolu taşımacılığına göre daha az CO<sub>2</sub> salınımı oluşturmasından hareketle, dünyanın birçok yerinde atık taşımacılığı için demiryolu kullanılmaktadır. Örneğin, Londra'nın batı bölgesinde belediye atıkları 1977'den beri raylı sistemlerle taşınmaktadır (Haul, 2004). Brent, Ealing, Harrow ve Hillingdon'tan toplanan, yılda 150 000 tondan fazla evsel atık, Victoria Road aktarma istasyonuna gelmektedir (West London Waste, 2022). Trenlere yüklenen atıklar enerjiye çevrilmek üzere, 1980'den beri faaliyet gösteren Avonmouth'taki atık aktarma istasyonuna getirilmektedir. Aktarma istasyonu 4 hektarlık alana sahiptir ve bu alanda trenlerin hareketi için raylar döşenmiştir. Aktarma istasyonunun hemen yanında ise atık geri dönüşüm tesisi bulunmaktadır. Benzer şekilde, Edinburgh'da 1989 yılından beri evsel atıklar demiryoluyla taşınmaktadır (Ratcliffe, 2019). New York, Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde ise atıkların %32'sinin nakliyesi demiryolu ile gerçekleştirilmektedir (Bauerlein ve King, 2018). Bu bölgeden çıkan arıtma çamurunun %85'i düzenli depolama sahalarına yine demiryolu ile taşınmaktadır.

İngiltere, ABD ve Avusturya gibi gelişmiş ülkelerde atıkların demiryolu ile taşınmasına ilişkin standartlar belirlenmiştir. Örneğin, İngiltere'de özel sektör bazlı yatırımlar sayesinde atıklar üretildiği yerden kamyonlarla alındıktan sonra demiryolu taşımacılığı ile deponi sahalarına aktarılabilir (Waste Management Solutions, 2022). Benzer şekilde ABD'de, Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency) tarafından 1973'te belirlenen standartlar bulunmaktadır (American Public Works Association, 1973). Avusturya'da atık yönetimi yönetmeliğinde güncelleme yapılarak atıkların demiryolu ile taşınmasına ilişkin yeni hükümler getirilmiştir (Rail Cargo Group, 2021). Buna göre, toplam ağırlığı 10 tondan fazla ve belirli bir taşıma mesafesinin üzerindeki atık taşımalarının demiryolu ile yapılmasına karar verilmiştir. Bu hükümler, genel itibarıyla, 2023'ten itibaren, 300 km ve üzeri mesafeler için, 2024'te 200 km'den itibaren ve 2026'dan itibaren 100 km'den sonraki mesafeler için geçerli olacaktır. Ayrıca, koronavirüs pandemisinin bir sonucu olarak

görülen tehlikeli atıkların taşınmasında gelişmiş ülkelerin demiryolu taşımacılığına daha fazla yönelmesi dikkat çekmektedir (Rados, 2021).

Ülkemizde ise atıkların şehir merkezlerinden alınarak depolama sahasına karayolu ile taşınması en yaygın olarak kullanılan atık taşıma yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Türkiye’de karayolu taşımacılığının payı, diğer ulaşım türleri ile birlikte dikkate alındığında %90 civarındadır (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2011). Oysaki atık taşıma işlerinin, ekonomik ve çevresel performansının bir sistem perspektifi üzerinden değerlendirilmesi gereklidir. Ayrıca, atık taşımacılığının, atık yönetimi kapsamında en maliyetli iş kalemlerinden biri olması sebebiyle, atık taşımacılığı alternatiflerinin doğru belirlenmesi sürdürülebilirlik açısından da önem arz etmektedir. Ulusal literatürde atık taşımacılığının karayolu ile yapılmasına ilişkin çalışmalar geniş yer tutmakla birlikte demiryolu seçeneğini değerlendiren bir çalışmaya rastlanmamıştır (Agha, 2006; Apaydın ve Gonullu, 2007; Or ve Curi, 1993; Rızvanoğlu, Kaya, Ulukavak ve Yeşilnacar, 2019).

## **1.1 Literatür Özeti**

Nüfusun artması, kentleşme ve ekonomik kalkınmanın yanı sıra yaşam tarzı, gelir düzeyi ve sosyo-ekonomik faktörlerin değişmesi, katı atıkların yönetiminde karmaşık özelliklerin oluşmasına sebep olmuştur. Sistemin genel performansını değerlendirmek için bu karmaşık yönetim gereksinimlerinin yazılımlarla desteklenmesi daha verimli sonuçlar vermektedir (Goulart Coelho, Lange ve Coelho, 2017; Morrissey ve Browne, 2004). Atık yönetimi modellerinin ise en büyük faydalarının karmaşıklık ve belirsizlikle başa çıkma yeteneklerinde olduğu belirtilmektedir (Eriksson vd., 2003; Keirstead, Jennings ve Sivakumar, 2012).

Atık yönetimde karar vermeyi desteklemek için atık yönetimde çeşitli modeller geliştirilmiştir. Önceleri, atık yönetim modellerinin amacının, atık transfer istasyonlarının konumlarını optimize etmek ve atık yönetim sistemi maliyetini en aza indirmek gibi tekdüze amaçlara dayalı olduğu görülmektedir (Somplak, Prochazka, Pavlas ve Popela, 2013; Yadav, Kalbar, Karmakar ve Dikshit, 2020). Bu kapsamda, atık yönetimde karar vermeye yardımcı olmak için çok ölçütlü karar verme yönteminin sıklıkla uygulandığı görülmektedir. Örneğin, AHP (Analytic Hierarchy Process) ve ELECTRE (Elimination and Choice Translating. Reality), ayrıca PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) ve GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Decision Aid) gibi karar destek

yöntemlerinden bazıları simülasyon modellemesi ile daha da geliştirilmiştir (Özkan, 2008; Vego, Kuçar-Dragičević ve Koprivanac, 2008). Çok ölçütlü karar verme yöntemleri, çok sayıda ölçütü değerlendirerek çeşitli senaryolar arasından en iyi performans gösteren senaryonun belirlenmesini sağlamaktadır (Hung, Ma ve Yang, 2007).

Son yıllarda, sürdürülebilir atık yönetimi, karar destek modellerinin, *çevresel olarak etkili, ekonomik olarak karşılanabilir ve sosyal olarak kabul edilebilir* olması gerektiğini vurgulayarak “sürdürülebilirlik” üzerine odaklanmıştır (Hung, Ma ve Yang, 2007). Bu çalışmalara ilişkin detaylar Çizelge 1.1’de verilmektedir. Atık yönetimi alanında en yaygın kullanılan karar destek modelleri, çevresel yönlere odaklanan “yaşam döngüsü değerlendirmesi”, ekonomik verimliliğin maksimize edilmesini amaçlayan “maliyet-fayda analizi” ve üç temel unsurun (ekonomik, sosyal ve çevresel ölçütler) dikkate alınmasına imkan veren “çok ölçütlü karar verme” yöntemlerine dayalıdır (Goulart Coelho, Lange ve Coelho, 2017; Morrissey ve Browne, 2004).

Çizelge 1.1 Atık yönetimde kullanılan modeller ve detayları

<b>Model</b>	<b>Kullanılma Amacı</b>	<b>Uygulama Alanı</b>	<b>Kaynak</b>
The Route View Pro	Atık toplama rotasının optimizasyonu	Trabzon, Türkiye	Apaydın ve Gönüllü, 2007
Mixed Integer Programming Model	Atık toplama rotasının ve toplama maliyetinin optimizasyonu	Deir El Balah, Gazze Şeridi	Agha, 2006
		İzmir, Türkiye	Or ve Curi, 2002
Yaşam Döngüsü Analizi	Paketleme atıklarının taşınmasına ait farklı senaryoların çevresel açıdan karşılaştırılması	İstanbul, Türkiye	Yıldız-Geyhan, Altun-Çiftçioğlu ve Kadırgan, 2017
Lineer Programlama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri	Evsel atık toplama rotasının optimizasyonu	Şanlıurfa, Türkiye	Rızvanoğlu, Kaya, Ulukavak ve Yeşilnacar, 2019
Input Parser-Kavramsal Model	Belediye atık toplama araçlarının rotalarının optimizasyonu	Doğu Finlandiya	Nuortio vd. 2006

Çizelge 1.2 Atık yönetiminde kullanılan modeller ve detayları (devamı)

Depot Model	Demiryolu ve kanal yoluyla atıkların taşınmasının planlanması	Brüksel	Kulcar, 1996
Multi-Echelon supply chain model (tedarik zinciri modeli)	Atık toplama, teslimat ve bertarafında etkileşimli ulaşım ve envanter planlaması	Çin	Zhang, Huang ve He, 2014
Dinamik Sistem Modeli	Kaynak ayrımı ve atık yönetiminin etkinliği arasındaki ilişkilerin belirlenmesi	Bangkok, Tayland	Sukholthaman ve Sharp, 2016
	Uzun vadeli kentsel katı atık yönetim planı oluşturma	Khulna, Bangladeş	Rafew ve Rafizul, 2021
Fayda Maliyet Analizi ("Agent-Based Modelling" ile birlikte)	İnşaat-moloz atığı yönetiminin maliyet-faydasının daha iyi anlaşılması ve etkili bir atık yönetim planının geliştirilmesi	Shenzhen, Çin	Ding vd., 2022
Yaşam Döngüsü Analizi	Gelecekte atık yönetiminde rol oynaması beklenen alanların belirlenmesi	-	Christensen vd., 2020

Bilindiği üzere, atıkların taşınması, atık yönetiminde en maliyetli aşamalardan biridir (Özkan, 2008). Bu durum, ulaşım yükünü azaltmak için çeşitli alternatifler üretme ve karşılaştırma ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Türkiye'de konut veya sanayi bölgelerinden toplanan atıkların, atık toplama araçları ile doğrudan veya dolaylı olarak atık bertaraf tesisine taşınması çoğunlukla karayolu taşımacılığı ile yapılmaktadır. Ancak, atıkların demiryolu ile taşınmasının dünya çapındaki örnekleri uzun zamandan beri gündemdedir. Örneğin, daha düşük oranda hava kirleticilerinin salınımı, daha az enerji gereksinimi ve trafik yoğunluğuna sebep olmaması sebebiyle, ABD'de atıkların demiryolu ile taşınmasına ağırlık verildiği görülmektedir (Peterson, 1996). Kuzey Carolina'da, optimum bir atık transfer alternatifi bulmak için raylı sistem ile atık taşımacılığı ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir (Peirce ve Pierson, 1983). Bu çalışmada, yükleme ve boşaltma seçenekleri, düz yataklı, gondol ve hazneli vagonlar kullanılarak detaylandırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, teknolojilerin kullanılabilirliğine işaret etmekle beraber, demiryolu şirketleri tarafından dayatılan idari

gerekliliklerin, atıkların demiryolu ile taşınmasını bu alanda rekabetçi olmaktan çıkarttığı vurgulanmaktadır.

Atık taşımacılığının karayolu ile yapılması durumunda, salınan CO<sub>2</sub> emisyonu, atık taşıma kamyonunun yakıt tüketimi, aks sayısı ve sürüş davranışı gibi birçok etkene bağlıdır. Bu sebeple, kamyonlar için elde edilen küresel ısınma faktörü, 0,091-0,557 kg CO<sub>2</sub>-eş./km arasında değişmektedir (Eisted, Larsen ve Christensen, 2009). Oysaki atıkların taşınmasında dizel yakıtlı trenler kullanıldığında küresel ısınma faktörü, 0,002-0,058 kg CO<sub>2</sub>-eş./km iken elektrikli trenler kullanıldığında 0,002-0,056 kg CO<sub>2</sub>-eş./km'ye kadar düşmektedir (Eisted, Larsen ve Christensen, 2009). Biyo-yakıtlar ve elektrik gibi alternatif yakıt kullanan vagonların kullanımı ile bu sera gazı emisyonları daha da azaltılabilir. Enerji tasarruflu teknolojilerin geliştirilmesiyle atıkların taşınmasında salınan sera gazının azaltılmasına katkı sağlanacağı aşikardır (Inghels, Dullaert ve Vigo, 2016).

Atık taşımacılığı kapsamında yapılan çalışmalar incelendiğinde, dünyada sadece evsel atıkların değil, diğer atık türlerinin de demiryolu ile taşındığına ilişkin örnekler olduğu görülmüştür. Örneğin, New York, ABD'de, Varick 2 aktarma istasyonuna evsel katı atıklar, park-bahçe atıkları ve inşaat yıkıntı atıkları birlikte taşınmaktadır (Wastebits, 2022). Avustralya'da Clyde aktarma istasyonundan yılda yaklaşık 500.000 ton evsel ve endüstriyel katı atık demiryoluyla konteyner sisteminde taşınmaktadır (The Odour Unit Pty Ltd, 2019). Güney Sidney, Avustralya'da, Botany Koyu, Rockdale, Woollahra, Waverley ve Kogarah belediyelerindeki ticari işletmelerden alınan atıklar Banksmeadow, Sidney aktarma istasyonuna getirilmektedir. Banksmeadow aktarma istasyonuna gelen yılda 400.000 ton geri dönüştürülebilir atık ve 100.000 ton geri dönüştürülemeyen atık Avustralya-Yeni Zelanda demiryolu ile Woodlawn'daki bertaraf ve geri dönüşüm tesisine taşınmaktadır (Veolia, 2022).

## **1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Atıkların taşınmasında, farklı alternatiflerin karşılaştırıldığı çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Yeni Zelanda'da, katı atıkların, Christchurch aktarma istasyonundan Kate Valley düzenli depolama sahasına karayoluyla ya da demiryoluyla taşınmasının ekonomik, çevresel ve toplumsal etkileri belirlenerek, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Schriiffer, 2006). Bu çalışmaya göre, atık transferi için demiryolu seçeneği kullanılmasının karayoluna göre en büyük avantajlarından biri işletme maliyetinin düşük olmasıdır. Aynı çalışmada, personel ve



yakıt maliyetinin de karayolu taşımacılığına göre daha düşük olması demiryoluyla taşımının ekonomik ve çevre dostu bir seçenek olduğunu göstermiştir. Atıkların demiryoluyla taşınmasının karayoluna göre bir diğer önemli avantajı, az sefer sayısı gerektirmesi ve yakıt kullanımının düşük olması ile daha az hava kirleticisi deşarjı olarak gösterilmektedir. Bu kapsamda, belediye atıklarının taşınması için yenilikçi demiryolu vagonlarının geliştirilmesine yönelik çalışmaların döngüsel ekonomiye de katkı sağlayacağı düşünülmektedir (Vidovic, Niksic ve Susak, 2022). Ayrıca Kabasakal ve Solak (2009) yapmış oldukları çalışmada, Türkiye’de demiryolu sektörünün diğer ulaşım türleri ile rekabet edilebilir düzeye ulaşmasının ve aldığı payın artırılmasının ulaşırma hizmetleri açısından önemli olduğunu vurgulamıştır. Yapılabilecek yenilikler ile altyapı ve işletmenin ayrıştırılarak işletmenin rekabete hazır hale getirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Ülkemizde ise demiryolu taşımacılığı karayoluna kıyasla geri planda kalmıştır. Demiryolu sektörüne ilişkin yatırımların artması ve diğer ulaşım türleri ile rekabet edebilir bir düzeye erişmesi, ulaşırma sektörünün gelişimi bakımında önem taşımaktadır. Demiryolu taşımacılığının diğer ulaşım türleri ile rekabet edilebilir düzeye ulaşması için ilk olarak altyapı kurulum aşaması ile taşımacılık sektörleri ayrılmalıdır. Bu şekilde demiryolu taşımacılığının kalkınacağı ve diğer sektörlerle rekabet edilebilir hale geleceği düşünülmektedir (Solak, 2011).

Bu sebeple, bu çalışmanın amacı, atık yönetiminin en maliyetli aşamalarından biri olan atık taşımacılığına ait alternatiflerin belirlenerek bu alternatiflerin çok ölçütlü karar verme kapsamında, çevresel yük, maliyet, teknik özellikler gibi ölçütler göz önünde bulundurularak karşılaştırılmasıdır. Bu çalışma, belirli bir transfer istasyonunda toplanmış atıkların belli bir mesafe uzaklıktaki düzenli deponi tesisine taşınmasını kapsamaktadır. Bu ölçütlerin önem dereceleri, sektördeki paydaşlara likert ölçeğinde anket uygulaması yapılarak elde edilecektir. Senaryoların ölçütler üzerindeki performansı hesaplanarak elde edilen tüm bu veriler Right Choice adlı karar verme modeline girilecektir. Model sayesinde, verilecek kararların sonuçlara etkisi duyarlılık analizi ile ölçülecek ve optimum olan alternatif(ler) belirlenecektir.

## 2. KARAYOLU VE DEMİRYOLU TAŞIMACILIĞININ KARŞILAŞTIRILMASI

Türkiye’de kayıtlı bulunan kara taşıtlarının %54,2’sini özel otomobiller, %16,3’ünü kamyonet, %15’ini motosikletler, %8’ini traktörler, %3,5’ini kamyon, %1,9’unu minibüs, %0,8’ini otobüs ve %0,3’ünü özel amaçlı taşıtlar oluşturmaktadır (Türkiye İstatistik Kurumu, 2022). Türkiye’de son yıllarda artan teşvik ile birlikte kullanımı da artan bir diğer alternatif kara taşıtı ise çevreci (elektrikli veya hibrit) arabalardır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2013). Günümüzde demiryollarında kullanılan trenler ise gücünü dizel yakıttan ya da elektrik enerjisinden almaktadır. Avrupa Birliği ülkelerinde elektrikli demiryolu hattı uzunluğu, tüm demiryolu ağının yaklaşık %50’sine yaklaşmışken, Türkiye’de demiryolu hattının sadece %20’si elektrik ile çalışan trenlere uygun olup geri kalanı (%80) dizel yakıt kullanan trenlere hizmet vermektedir (Solak, 2013).

Karayollarında atık taşıma aracı olarak kullanılan çekici ve dorselere ait görseller Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de verilmiştir. Beş veya daha çok dingilli yarı ve/veya tam römorklu araçlarda taşıma karayolları istiap sınırı 42 tondur (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012). Bu sebeple uzun mesafe taşımalarında genellikle çekici ve dorse ile taşıma işlemleri yapılmaktadır.



Şekil 2.1. Çekici görseli



Şekil 2.2. Dorse görseli

## 2.1 Karayolu Yatırım Maliyeti ve Enerji Gereksinimi

Karayolu yapım maliyeti, karayolunun kullanım amacına, arazinin topoğrafik ve jeolojik yapısına, yol üzerinde yapılması planlanan sanat yapıları sayısına, kamulaştırma miktarına, yol aydınlatması için gereken kısımların uzunluğuna göre değişiklik göstermektedir. Bu sebeple, otoyol ve devlet yolları yapımı arasında bakım maliyeti açısından fark bulunabilmektedir. Vergilerin, kamulaştırma ve köprü yapım maliyetlerinin dahil edilmediği dalgalı arazide bölünmüş yol yapım maliyeti, 2008 yılı için 2.564.764 TL/km olarak verilmektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2009a). Özelleştirme İdaresi Başkanlığı (2007)'nin yayınladığı verilere göre, 1 km otoyolun ortalama yapım maliyeti ise 8,19 milyon dolar/km'dir. Karayolunun bakımı, karayolu ile ilgili tüm yapı ve tesislerin ilk yapıldıkları duruma olabildiğince yakın tutulması sağlanarak ömrünün uzatılmasını, trafik güvenliğinin sağlanması için gerekli tüm işlerin yapılmasını ve yolların devamlı açık tutulması için kış sezonu boyunca buzlanmaya karşı alınacak önlemleri kapsamaktadır (Gerçek, 2001).

İngiltere'de otoyollarda (tipik olarak 6 şeritli) kilometre başına düşen yıllık ortalama bakım maliyeti yaklaşık 120.000 dolardır (Gerçek, 2001). Türkiye'de ise Karayolları Genel Müdürlüğü (2009b; 2009c)'nün verilerine göre 2008 yılı birim fiyatlarıyla 1 km otoyolun (2

metre genişliğinde x 3 şerit) yıllık rutin bakım maliyeti 65.514 TL iken, 1 km devlet yolunun (2 metre genişliğinde x 2 şerit) yıllık rutin bakım maliyeti 13.703 TL'dir.

Son yıllarda otomobil sahipliğinin artmasıyla birlikte, özellikle gelişmekte olan ülkelerde trafik sıkışıklığı ve beraberinde gelen emisyon salınımları artmaya devam etmektedir. Yüksek inşaat maliyetleri ve yasal kısıtlamalar, geleneksel yolların altyapısının genişletilmesi çalışmalarını da engellemektedir (Giunta, Lo Bosco, Leonardi, ve Scopelliti, 2019). Bu nedenle, trafik sıkışıklığını ve emisyonları azaltmak için uygun maliyetli trafik yönetim çözümleri üretmek, özellikle gelişmekte olan ülkelerde ulaşım ile ilgilenen otoritelerin karşılaştığı en önemli zorluklardan biri haline gelmektedir. Li ve Lasenby (2022), yaptıkları çalışmada, çevresel açıdan sürdürülebilir ve nispeten düşük maliyetli aktif bir trafik yönetimi (ATM-Active Traffic Management) sistemi geliştirmişlerdir. Önerilen sisteme ilişkin simulasyon sonuçları, ATM ile seyahat süresini, karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve nitrojen oksit (NO<sub>2</sub>) salınımının sırasıyla %7,5, %21,1 ve %10,7 oranında azaltabildiğini göstermektedir.

## **2.2 Demiryolu Yatırım Maliyeti ve Enerji Gereksinimi**

Demiryolu yapım maliyeti, arazinin topoğrafik ve jeolojik yapısına, yol üzerindeki sanat yapılarının sayısına, kamulaştırma miktarına ve durak gereken kısımların uzunluğuna bağlı olarak yük veya yolcuya yönelik yapılmasına göre değişiklikler göstermektedir. Demiryollarında hızlı tren ve konvansiyonel trenlerin hat yapımı arasında farklılıklar bulunmaktadır. Devlet Demiryolları Genel Müdürlüğü Araştırma Planlama Koordinasyon Daire Başkanlığı (2003) tarafından yayınlanan verilere göre, çift hatlı, sinyalli ve elektrikli demiryolu hattının yapım maliyeti 2,96 milyon dolar/km'dir.

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (2009)'na göre ülkemizde hızlı tren altyapı yapım maliyetleri ortalama 4,53 milyon dolar/km'dir. Demiryolu bakımı, hatların bakımı ve onarımı, elektrifikasyon, sinyalizasyon, telekomünikasyon ve diğer maliyetleri içermektedir. Ülkelerin geneline bakıldığında demiryollarının toplam bakım ve işletme maliyetlerinin yaklaşık %40-65'ini hat bakımı, %15-40'ını sinyalizasyon maliyeti oluşturmaktadır (Campos, de Rus ve Barron, 2007). Bu maliyet kalemleri içerisinde personel maliyetinin ise önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir. Levinson, Mathieu, Gillen ve Kanafani (1997), yaptıkları çalışmada tren bakım maliyetini 2,83 dolar/km olarak vermektedir.

Demiryolu taşımacılığında dizel yakıt veya elektrik kullanılmaktadır. Kabasakal ve Solak (2010), yapmış oldukları çalışmada konvansiyonel tren birim yük başına düşen işletme

maliyetinin 0,01472 TL/ton-km olduğunu belirlerken, yakıt maliyetini 3,6154 TL/km (21 kWh/km) olarak kabul etmişlerdir. Dizel lokomotiflerde yakıt tüketimi km başına 7-9,5 L arasında değişmektedir. Elektrikli lokomotiflerde km başına tüketim 1000 tren-ton için 22.000 beygir gücüne (BG) sahip lokomotiflerde 25 kWsa iken 68.000 BG olan lokomotiflerde 38 kWsa'dır (Sezer, 2019).

Bunun yanı sıra, enerji tasarrufu ve karbon azaltma performansı sayesinde demiryolu taşımacılığı enerji politikaları kapsamında ilgi odağı haline gelmektedir. Avrupa Komisyonu'nun 2015 yılı verilerine göre, tüm ulaştırma sektörü tarafından kullanılan enerjinin %2,2'si demiryoluna ait olmaktadır, yolcu ve yük cirosunun %9'undan fazlasına da demiryolu taşımacılığının katkısı olmaktadır (European Commission Directorate-General for Mobility and Transport, 2015). Özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde 1000 km'lik seyahat için yüksek hızlı demiryolu taşımacılığı, düşük maliyetli havayollarına karşı güçlü bir rakip haline gelmiştir (Dalla Chiara, De Franco, Coviello ve Pastrone, 2017). Örneğin, Çin'in yüksek hızlı demiryolu, enerji tasarrufu ve karbon azaltma performansı ile dikkat çekmektedir. Wang, Zhou ve Ou (2021) daha temiz enerji alt yapısı ve hızlı tren teknolojisinin ilerlemesi ile 2020'de yüksek hızlı trenlerin enerji tüketimi ve karbon emisyonlarının 2015'e kıyasla %20 azaldığını göstermiştir. Aynı çalışmada, Çin'de yüksek hızlı tren ulaşım modelinin düşük karbon üretimi avantajını güçlendirmek amacıyla hızlı demiryolu ağının kapsamının iyileştirilmesi, trenlerinin tam yük oranının dengelenmesi ve elektrik arzının düşük karbonlu kaynaklarla karşılanması tavsiye edilmektedir. Tüm bu gelişmeler, demiryolu taşımacılığının enerji tasarrufu sağlayan bir ulaşım şekli olduğunu göstermektedir (Lombardi, Tribioli, Cozzolino ve Bella, 2017).

### **2.3 Taşımacılıkta Personel İhtiyacı**

Konvansiyonel trenler ile yük taşıma işlemleri için 3 personel gereklidir. (Kabasakal ve Solak, 2010). 1000 ton atığın tır ile taşınacağı ve tır kapasitesi göz önüne alındığında, taşıma için 50 tır gerekli olmaktadır. Her tırın bir şoförü olması gerekirken demiryolu taşımacılığında ise aynı atık miktarı tren başına 1 makinist ve 2 yardımcı personeli istihdam edilerek taşınabilmektedir.

### 3. DEMİRYOLU İLE ATIK TAŞIMACILIĞI

Atık taşıma araçları olarak kullanılan çekici ve dorselerin genellikle trene yüklenmesi ile taşıma işlemi yapılabilmektedir. Çekici ve dorse birlikte trene yüklenebildiği gibi sadece dorselerin de trene yüklenmesi mümkündür. Bunun yanı sıra, atıkların ve yüklerin direkt olarak trene yüklenebileceği vagon türleri de bulunmaktadır. Vagon özelliklerine göre yükleme alanı göz önüne alındığında çekici ve dorse yüklemesi için R tipi vagon, atık yüklenmesi içinde U tipi vagon uygun olmaktadır (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, 2019). Şekil 3.1 de ve Şekil 3.2 de vagon görselleri Çizelge 3.1’de ise vagon özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.1. R tipi platform vagon (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, 2019)



Şekil 3.2. U tipi uagoos-w tipi tahıl vagonu (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, 2019)

Çizelge 3.1. Vagon özellikleri (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, 2019)

	En	Boy	Dara	Atık Taşıma Kapasitesi
<b>R Tipi Vagon</b>	2,7 metre	18,4 metre	21 ton	69 ton
<b>U Tipi Vagon</b>	2,9 metre	13,4 metre	20,6 ton	59,4 ton

### 3.1 Çekici ve Dorsenin Trene Yüklenmesi

Atık taşıma aracının dorsesiyle beraber trene yüklenmesi uygulaması, Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Bu uygulama ile uzun mesafelerdeki taşımacılıklarda yakıttan tasarruf sağlanırken şoförlerin de dinlenmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.3. Çekici ve dorsenin trene yüklenmiş hali (Uysal, 2015a)

### 3.2 Sadece Dorsenin Trene Yüklenmesi

Atık taşıma araçlarının sadece dorselerinin trene yüklenmesi ile oluşan taşıma şekli Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Sadece dorseler trene yüklendiğinde taşıma operasyonu sistemin aksamaması ve durması durumunda atıkların, sistem aksamayacak şekilde çalışmasına olanak vermektedir.





Şekil 3.4. Sadece dorsenin trene yüklenmiş hali (Uysal, 2015b)

### 3.3 Atığın Direkt Tren Vagonlarına Yüklenmesi

Atıkların direkt olarak tren vagonlarına yüklendiği taşıma sistemidir. Bu şekilde taşıma ile çekici ağırlıklarından olan kazanım ile en fazla atık taşıma işlemi gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Atıkların direkt olarak vagona yüklenmiş hali (Finnmoller, 2010)



## 4. MATERYAL YÖNTEM

Sonuçların analizi, birden fazla seçeneğin olduğu ve belli ölçütlere göre en uygun çözümün belirlenmesinin gerekli olduğu durumlar için tasarlanmış bir bilgisayar programı olan Right Choice (2.0 versiyonu) kullanılarak yapılmıştır. Çok ölçütlü karar verme analiz programı olan Right Choice (Ventana Systems UK, 2022), ticari ve akademik olarak ücretsiz olarak kullanılabilir. Bu karar verme yazılımı sayesinde, kullanıcı tarafından girilen veriler paydaşların kullanımı için gerekli bilgilere çevrilebilmektedir. Bu kapsamda, sınır analizi ve duyarlılık analizi yapılarak, problemin çözümü için oluşturulan alternatiflerin (senaryoların), belirlenen ölçütler (yatırım maliyeti, elektrik tasarrufu, su gereksinimi, vb.) üzerindeki performansı belirlenebilmektedir. Bu amaçla izlenen aşamalar aşağıda sıralanmıştır:

(1) Kaynak taraması sonuçlarına göre karar ağacı oluşturulmuş ve ölçütler belirlenmiştir (Bölüm 4.1).

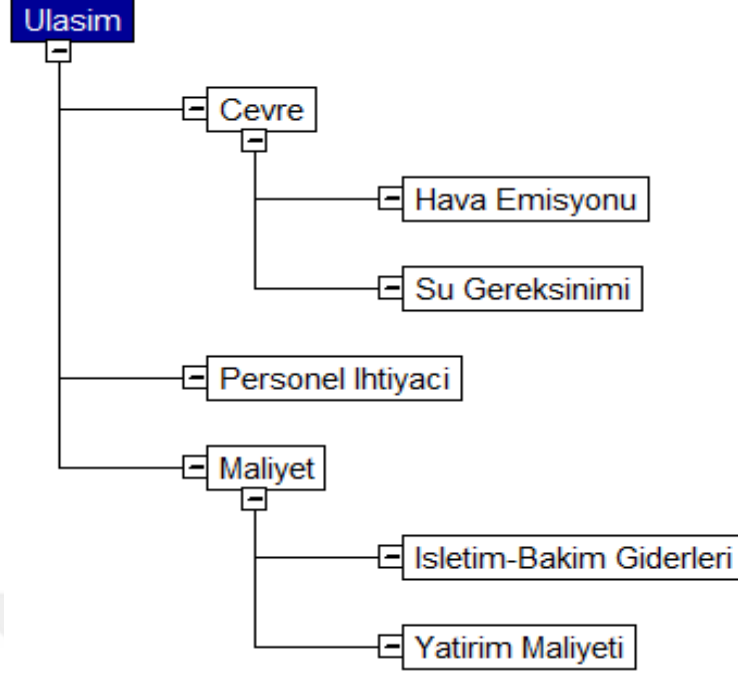
(2) Atıkların taşınmasına yönelik dört farklı alternatif üretilmiştir (Bölüm 4.2).

(3) Bu alternatiflerin karar ağacındaki her bir ölçüt için olan performansı ölçülmüştür. Ölçümler, 0-100 değer aralığında puanlanmıştır (Bölüm 4.3).

(4) Karar ağacındaki ölçütleri karşılaştırılabilir bir seviyeye getirmek için likert ölçekli anket kullanılarak göreceli önem derecelendirmesi yapılmıştır (Bölüm 4.4).

### 4.1 Karar Ağacı

Literatür taramasında değinildiği üzere, atıkların taşınmasında en uygun senaryonun belirlenmesi için araştırmacılar tarafından önemli olarak belirlenen ölçütlerin en başında çevresel faktörler (küresel ısınma potansiyeli vs.) ve maliyet yer almaktadır (Apaydın ve Gonullu, 2007; Or ve Curi, 1993; Rızvanoğlu, Kaya, Ulukavak ve Yeşilnacar, 2019). Bunun yanı sıra, bu faktörler içerisinde, çalışma bölgesinin karakteristik özelliklerine bağlı olarak sosyal ve kültürel ölçütleri de dahil eden çalışmalar bulunmaktadır (Yıldız-Geyhan, Altun-Çiftçioğlu ve Kadirgan, 2017). Bu faktörler göz önüne alınarak oluşturulan karar ağacı Şekil 4.1’de verilmektedir.



Şekil 4.1. Atık transferi karar ağacı

#### 4.2 Alternatiflerin Belirlenmesi

Çok ölçütlü karar verme analizi kapsamında dört statik alternatif belirlenmiştir. Bu alternatiflerin her birinde farklı atık taşıma yöntemleri seçilmiştir. Alternatif-1’de karayolu taşımacılığı baz alınırken, Alternatif-2, 3 ve 4 demiryolu taşımacılığının farklı tiplerini içermektedir. Demiryolu içerikli bu alternatiflerde, dizel trenlere kıyasla işletme maliyeti düşük olduğu için elektrikli trenlerle taşımacılık yapılacağı değerlendirilmektedir.

Genel olarak, demiryolu kullanımı, karayolu ile ulaşımı zor bölgelerde ve demiryollarının yapımının uygun olduğu bölgeler için elverişlidir. Gidiş – geliş mesafesinin 100 km’den fazla olması ve günde ez az 1000 ton çöp taşınması durumunda, aktarma istasyonlarında sıkıştırma yapılarak vagonların sadece atık taşımacılığı için kullanılması gerekmektedir (Mısıır, 2015). Bu sebeple, oluşturulan demiryolu içerikli alternatiflerde (Alternatif 2, 3 ve 4), taşıma yapılan mesafenin 100 km’ye kadar olduğu ve yaklaşık 1000 atığın taşındığı kabul edilmiştir. Bu sayede, demiryolu içerikli alternatiflerde atıkların sadece vagonlara yüklenerek değil, çekici ve/veya dorsellerle vagonlara yüklenmesi seçenekleri de değerlendirilmektedir. Ayrıca bertaraf sahalarının tren yolu yanında olduğu veya tren ile giriş yapılabilen alanlarda konumlandırıldığı esasları üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

#### 4.2.1 Alternatif 1

Bu bölümde karayolu üzerinde taşımacılık esas alınmıştır. 4.2. Bölümde açıklandığı üzere atık taşımacılığının karayolunda tıra monteli dorse ile bertaraf sahasına taşındığı kabul edilmiştir. Buna bağlı olarak çok ölçütlü karar verme analizi programı için toplam emisyon, taşıma işlemi için işçi ihtiyacı ve maliyet hesaplanmıştır. Tüm bu hesaplamalara ait detaylar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Alternatif 1 için hesaplamalar

Hesaplanan Unsurlar	Veriler, Birimler ve Kaynaklar
Dorsenin atık taşıma kapasitesi	20 ton/dorse (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
Yakıt sarfıyatı	0,5 L/km (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
Sefer sayısı	50 sefer
Toplam gidiş-dönüş mesafesi (1000 ton/gün atık için)	10.000 km
Toplam yakıt sarfıyatı (1000 ton/gün atık için)	5.000 L/gün (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
Toplam emisyon	13.400 kg CO <sub>2</sub> -eş/L/gün (Yaşar ve Eren, 2008)
Personel ihtiyacı	50 kişi
Taşıma süresi (1000 ton/gün atık için)	125 saat/gün (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
İşletme Maliyeti	111.100 TL/gün (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
Personel maliyeti	7.088,333 TL/gün (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)

#### 4.2.2 Alternatif 2

Bu alternatif, atık taşıyan çekici ve dorsenin trene yüklenerek bertaraf sahasına götürülmesini kapsamaktadır. Bunun için, Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (2019) vagon rehberine göre bilgiler neticesinde R tipi vagon (Şekil 3.1’te gösterildiği gibi) seçilmiştir. Çekici ve dorsenin birlikte vagona yüklenerek taşınmasının, sadece dorsenin vagona yüklenmesine göre avantajları bulunmaktadır. Atık taşımacılığında çekici ve dorsenin birlikte taşınması olası bir kaza ya da arıza durumunda, zaman kaybı olmadan operasyonun diğer araçların yardımı ile devam edebilmesidir. Vagonlarda sadece atıkların taşındığı lokomotifin bozulduğu varsayıldığında operasyon, sorun giderilene kadar durmak durumunda

kalacaktır. Ayrıca tren yolunun bakım çalışmasında operasyonun uzun süreli durması tehlikesi ortaya çıktığında Alternatif 2'nin avantajı ön plana çıkmaktadır. Alternatif 2 için yapılan hesaplamalar Çizelge 4.2.'te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Alternatif 2 için hesaplamalar

Hesaplanan Unsurlar	Veriler, Birimler ve Kaynaklar
Lokomotifin kapasitesi	1250 ton (Sezer, 2019)
Enerji sarfiyatı	166,592 kWsa/km (Sezer, 2019)
Sefer sayısı	3 sefer
Dorsedeki atık ağırlığı	20 ton (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
Çekici ve atık dolu dorse ağırlığı	40 ton
R Tipi Vagon Darası	21 ton (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, 2019)
Gerekli dorse sayısı	50 adet
Gerekli vagon sayısı	50 adet
Tren sefer sayısı	3 sefer/gün
Toplam mesafe (tren ile)	600 km/gün
Enerji sarfiyatı	364,8 kW
Emisyon	179 kg CO <sub>2</sub> -eş/L-gün (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2013)
Personel sayısı	59
Taşıma süresi	3,75 sa/gün (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
İşletme maliyeti	9.363,79 TL/gün (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)

### 4.2.3 Alternatif 3

Alternatif 3 sadece dorsenin trene yüklenerek bertaraf sahasına taşınmasını temsil etmektedir. Alternatif 3'te, Alternatif 2'ye kıyasla, yaklaşık 7,5 ton civarında olan tırın çekici yükünden tasarruf edilerek, yalnızca dorse yükleri (çekici olmadan) hesaba dahil edilmiştir. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (2019) vagon rehberinden alınan bilgiler neticesinde R tipi vagon seçilmiştir. Alternatif 3'te, Alternatif 2'ye göre daha az ağırlığın taşınacak olması sebebiyle sefer sayısının daha düşük olması ve bu sayede de emisyon değerlerinin ve maliyetin az olması ön plana çıkmaktadır. Alternatif 3'te, olası bir demiryolu kazası ya da arızası durumunda, dorseler trene yüklendiği için, atık taşıma operasyonu

karayolu üzerinden devam edebilecektir. Alternatif 3'teki hesaplama ile ilgili detaylar Çizelge 4.3.'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Alternatif 3 için hesaplamalar

Hesaplanan Unsurlar	Veriler, Birimler ve Kaynaklar
Lokomotifin kapasitesi	1.250 ton (Sezer, 2019)
Enerji sarfıyatı	166,592 kWsa (Sezer, 2019)
Sefer sayısı	3 sefer
Dorsenin atık kapasitesi	20 ton (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
Tam kapasite atık yüklü dorse ağırlığı	32,5 ton (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
R tipi vagon darası	21 ton (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, 2019)
Gerekli dorse sayısı	50 adet
Gerekli vagon sayısı	50 adet
Tren sefer sayısı	3 sefer
Mesafe	600 km/gün
Enerji sarfıyatı	364,8 kW (Sezer, 2019)
Emisyon salınımı	179 kg CO <sub>2</sub> -eş/L (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2013)
Personel ihtiyacı	34 kişi
Taşıma süresi	3,75 sa/gün (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
İşletme maliyeti	5.820 TL/gün (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)

#### 4.2.4 Alternatif 4

Alternatif 4'te sadece atıkların tren vagonlarına yüklenerek bertaraf sahasına götürüldüğü esas alınmıştır. Alternatif 4'ün diğer demiryolu içerikli alternatiflerden (Alternatif 2 ve 3) farkı çekici ve dorse ağırlıklarından tasarruf edilerek yalnızca atıkların taşınacak olmasıdır. Bu kısım için, Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (2019) vagon rehberinden alınan bilgiler neticesinde U tipi vagon seçilmiştir. Alternatif 4'ün en belirgin ön plana çıkan özelliği dorse ve çekici ağırlıkları yerine atık taşınması, atıkların tren ile bertaraf sahasına götürülmesiyle tren sefer sayılarında önemli bir azaltmaya gidilecek olmasıdır. Bu sayede, hem personel ihtiyacının, hem de hava emisyon ve maliyet değerlerinin düşmesi söz konusudur.

Özellikle büyükşehirlerde sokaklardan atıkların toplanması ilçe belediyeleri tarafından gerçekleştirilmektedir. İlçe belediyeleri daha küçük çöp kamyonları ile atıkları toplamakta, büyük araçlara aktararak bertaraf sahalarına iletmekte veya büyükşehir belediyeleri himayesindeki aktarma istasyonlarına getirmektedir. Aktarma istasyonlarından alınan bu atıklar çekici ve dorse operasyonu ile bertaraf sahasına taşınmaktadır. Alternatif 4 ile ilgili hesaplamalar ve detaylar Çizelge 4.4.'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Alternatif 4 için hesaplamalar

<b>Hesaplanan Unsurlar</b>	<b>Veriler, Birimler ve Kaynaklar</b>
Lokomotifin kapasitesi	1.250 ton (Sezer, 2019)
Enerji sarfıyatı	166,592 kWsa (Sezer, 2019)
Sefer sayısı	2 sefer
U tipi yana açılır vagon tipi kapasitesi	52 ton (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, 2019)
U tipi yana açılır vagon tipi darası	21 ton (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, 2019)
Gerekli U tipi vagon sayısı	19 adet
Mesafe	400 km/gün
Enerji Sarfıyatı	243,2 kW (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2013)
Emisyon Salınımı	119 kg CO <sub>2</sub> -eş/L (Yaşar ve Eren, 2008)
Personel ihtiyacı	6 kişi
Taşıma süresi	2,5 sa/gün
İşletme maliyeti	1.517 TL (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)

### 4.3 Ölçüt Performanslarının Elde Edilmesi

Bu çalışma kapsamında atıkların taşınmasına ilişkin hesaplamalarda kullanılan maliyet ve emisyon değerlerine ilişkin verilere ilişkin detaylar Çizelge 4.5'de verilmektedir. Alternatiflerin hava emisyon değerleri hesaplanırken karayolu taşımacılığının temsil edildiği Alternatif 1'de sadece tırların kullanımına bağlı oluşan emisyon dikkate alınmıştır. Tırların kullandığı yakıtın imal edilmesi süresince salınan emisyon değeri, operasyon sırasında çıkan emisyonu ile kıyaslandığında çok düşük kaldığı için hesaba katılmamıştır. Fakat hava performansı değerlendirmesinde, Alternatif 2, 3 ve 4'te kullanılan elektrikli trenin ihtiyacı

olacak elektriğin üretilmesi aşamasında açığa çıkan emisyon değerleri hesaba katılmıştır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2013).

Çizelge 4.5. Hesaplamalarda kullanılan veriler

Ölçütler için gerekli veriler	Veri (birim)	Açıklama/Kaynak
Mazot Fiyatı	22.22 TL	28 Nisan 2022 itibariyle
Elektrik üretimi maliyeti (Ticarethane)	2.74 TL/kW	Nisan ayı itibariyle geçerli, içinde vergiler dahildir (Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş., 2022)
1 L dizel yakıtın yakılması ile üretilen ortalama emisyon	2,68 kg CO <sub>2</sub> -eş/L	Yaşar ve Eren (2008)
Elektrikli tren enerji tüketim miktarı	60.8 kW	Elektrikli lokomotifin gücü/ çalışma saati (Sezer, 2019)
Elektrikli tren enerji tüketim miktarı	38 kWsa	1250 ton yük için harcanacak enerji miktarı (Sezer, 2019)
Elektrikli tren enerji sarfiyatı	166.5 TL/km	Yapılacak sefer saatine bağlı değişken ticarethane elektrik satışı*harcanan kW miktarı (Sezer, 2019)
1 KW enerji üretimi için oluşan emisyon	0.49 kg CO <sub>2</sub> -eş/L	EPDK enerji üretimi için katsayılar kullanılmıştır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2013)
Tırın yakıt sarfiyatı	0.5 L/km	Mesafe ve taşıma yüküne bağlı ortalama yakıt (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
Toplam taşınacak atık	1000 ton/gün	Mısır (2015)
Elektrikli lokomotifin çekebileceği yük kapasitesi	1250 ton/adet/sefer	Elektrikli Lokomotifin çekeceği maksimum yük miktarı (Sezer, 2019)
Rota uzunluğu	100 km	Mısır (2015)
Çekici ağırlığı	7.5 ton/adet	Depo doluluk oranına göre değişmektedir. Ortalama 7,5 ton kabul edilmiştir (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)

Çizelge 4.6. Hesaplamalarda kullanılan veriler (devamı)

Tır dorsesinin atık kapasitesi	20 ton	Dorselerin ortalama taşıma sınırınıda sağlayarak aldıkları atık kapasitesi (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
1 R tipi vagon atık alma kapasitesi	69 ton	TCDD Vagon Rehberi (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, 2019)
Çekici ve atık dolu dorse ağırlığı	40 ton	Tır (çekici ve atık dolu dorse ağırlığı toplamı) karayolları taşıma sınırında alınmıştır. (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
1 R tipi vagon darası	21 ton/adet	TCDD Vagon Rehberi (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, 2019)
Dolu tırın dorse ağırlığı	32.5 (ton/adet)	Dorse ağırlığı alabileceği atık ve darası toplamına eşittir (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2012)
U tipi yana açılır vagon darası	20.6 ton/adet	Vagonun boş ağırlığı (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, 2019)
U tipi yana açılır vagonun atık kapasitesi	52 ton/adet	Atık taşıma için seçilen vagon tipi atık alma kapasitesi (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, 2019)

Bilindiği üzere, çevre ve maliyet unsurlarının yanı sıra personel ihtiyacı da taşımacılıkta önem taşımaktadır. Bu konuda daha fazla personel ihtiyacının istihdam olanaklarını artırılması söz konusuysen, daha az personel ihtiyacının makineleşmeye hız kazandıracacağı düşünülmektedir. Atık taşımacılığının karayolu ya da demiryolu ile yapılması durumlarında gerekli personel ihtiyacı Çizelge 4.6’de verilmektedir.

Çizelge 4.7. Atık taşımacılığında personel ihtiyacı

Personel İhtiyacı	Kişi	Açıklama
Karayolu taşımacılığında 1 atık kamyonu	1	Her bir araç kullanımı için yasal olarak tır kullanma yeterliği olan şoför gereklidir.
Demiryolu taşımacılığında 1 atık treni	3	1 makinist lokomotifini kullanmak için, 2 yardımcı yükleme- boşaltma organizasyonu ve takibi için gereklidir



Öztürk ve Öztürk (2018) yapmış oldukları çalışmada karayolu ile demiryolu taşımacılığına ait su gereksinimini kıyaslamışlardır. Sonuç olarak, her iki tür taşımacılıkta da su performansı açısından belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Bu sebeple, Alternatif 1, 2, 3 ve 4 için su ihtiyacı performansları eşdeğer olarak modele girilmiştir. Çalışmada ayrıca, mevcut taşımacılığın yapılacağı bölgede, karayolu ve demiryolunun hali hazırda tamamlanmış olduğu ve yatırım maliyetinin bu kapsamda birbirinden ayırt edici derecede farklı olmayacağı görülmüştür (Bölüm 3). Ancak, Bölüm 3'te belirtildiği üzere, bakım ve işletme giderleri açısından önemli farklar içeren karayolu ve demiryolu seçenekleri için karar ağacındaki “İşletme Bakım Giderleri” ölçütünün alternatifler üzerindeki performansı, Bölüm 5 (Çizelge 5.3)'te açıklandığı şekliyle modele dahil edilmiştir.

#### 4.4 Göreceli Önem Değerlendirmesi

Özel sektörde katı atıkların toplanması, taşınması, bertarafı, tıbbi atık tesislerinin işletilmesi, içme suyu ve atık su arıtma tesislerinin yönetimi, metal-plastik hammadde üretimi yapan fabrika ve geri dönüşüm tesislerinde görev alan 24 Çevre Mühendisi ile belediye atık yönetimi birimlerinde, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve il özel idarelerde görev alan 8 Çevre Mühendisi olmak üzere, toplam 32 Çevre Mühendisi paydaşın katılımı ile gerçekleştirilen anket kullanılarak göreceli önem derecelendirmesi yapılmıştır (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.8. Anket

Anket Soruları	Likert Ölçeği
Katı atıkların taşınması kapsamında aşağıdaki ölçütlerin önemini nasıl derecelendirirsiniz?	
• Çevre	% 10 -%20 - %30 - %40 - %50
• Ekonomi	
• Personel İhtiyacı	
• Diğer (var ise)	
Katı atıkların taşınması konusunda belirlenen alternatiflerin çevreye olan etkilerinin önemini nasıl derecelendirirsiniz?	
• Su Gereksinimi	% 10 -%20 - %30 - %40 - %50
• Hava Emisyonu	
• Diğer (var ise)	
Katı atıkların taşınması konusunda belirlenen alternatiflerin ekonomiye olan etkilerinin önemini nasıl derecelendirirsiniz?	
• İşletme ve Bakım Giderleri	% 10 -%20 - %30 - %40 - %50
• Yatırım Maliyeti	

Çizelge 4.7. Anket (devamı)

• Diğer (var ise)	
-------------------	--



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde, atıkların taşınması, çevreye, hava emisyonu ve atıksu deşarjı en az olacak şekilde ve mümkün olan en düşük maliyetle, personel ihtiyacı da göz önüne alınarak çok ölçütlü karar analizi kapsamında incelenmiştir.

Bu amaçla, Materyal ve Yöntem’de değinildiği üzere dört farklı alternatif (senaryo) oluşturulmuştur. Her bir alternatifin, karar ağacında gösterilen (Şekil 4.1) ölçütlere [çevre (hava emisyonu, su gereksinimi), maliyet (işletme-bakım, yatırım), personel ihtiyacı] göre performansı hesaplanmıştır. Daha sonra her bir ölçüt, anket çalışması ile elde edilen göreceli önem derecelendirmesi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır.

Elde edilen bu veriler, çok ölçütlü karar verme analizi kapsamında Right Choice programına işlenerek optimum alternatif belirlenmiştir. Ayrıca, ölçütlerin göreceli önemindeki herhangi bir değişikliğe karşı (paydaşların fikir değişikliği ya da şartların önümüzdeki dönemlerde farklılaşması gibi), model programında duyarlılık analizi yapılmıştır.

### 5.1 Senaryoların Ölçüt Performansları

Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3 sırasıyla alternatiflerin çevre ve alt ölçütleri, personel ihtiyacı ile maliyet ve alt ölçütlerindeki performanslarını göstermektedir.

Çizelge 5.1. Çevre performansı

Alternatifler	Emisyon Salınımı (kg CO <sub>2</sub> -eş)	Hava Performans (%)
Alternatif 1	18 760	0
Alternatif 2	238	1
Alternatif 3	179	99.5
Alternatif 4	119	100

\*Performans değerleri hesaplanırken örneğin en düşük hava emisyon değerine sahip alternatif %100, en yüksek değere sahip alternatif ise %0 olarak belirlenmiştir. Ara değerler % 0-100 aralığına normalize edilerek hesaplanmıştır.

Çizelge 5.2. Personel ihtiyacı performansı

Alternatifler	Personel ihtiyacı (kişi)	Performans (%)
Alternatif 1	70	16
Alternatif 2	82	0
Alternatif 3	44	50
Alternatif 4	6	100

Çizelge 5.3. Maliyet performansı

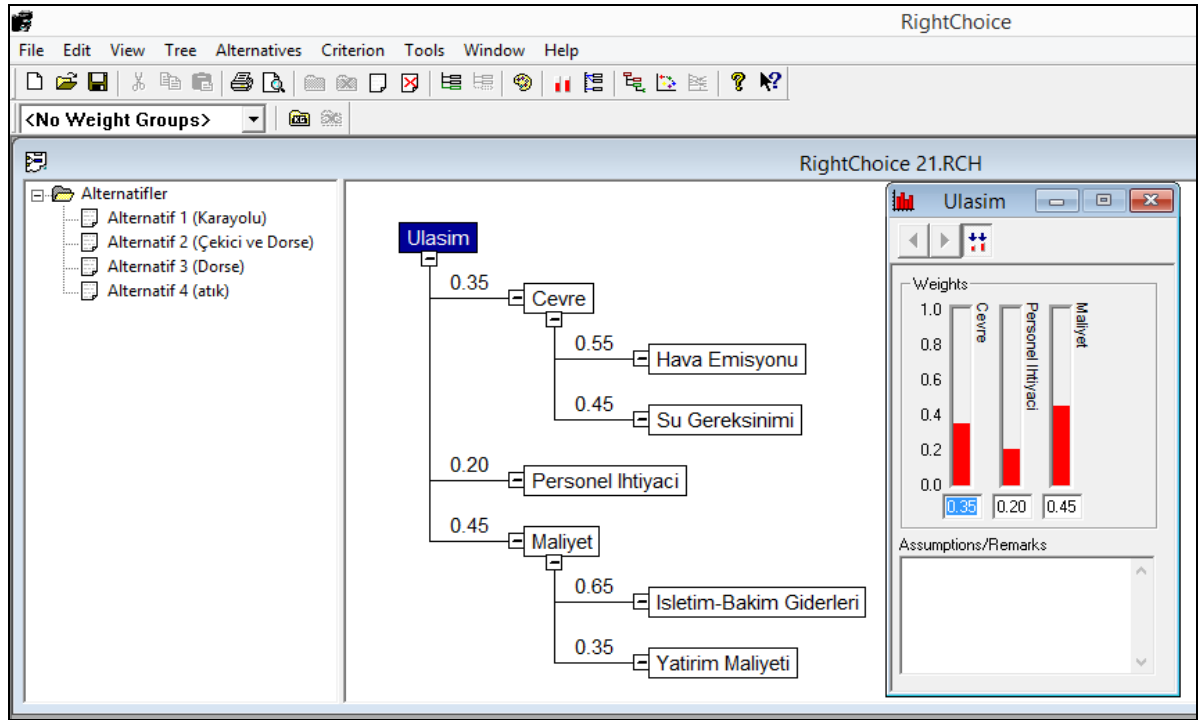
<b>Alternatifler</b>	<b>İşletme maliyeti (TL/gün)</b>	<b>Performans (%)</b>
Alternatif 1	165 464	0
Alternatif 2	12 958	92
Alternatif 3	7 237	97
Alternatif 4	1 517	100

## 5.2 Göreceli Önem Derecelendirmesi

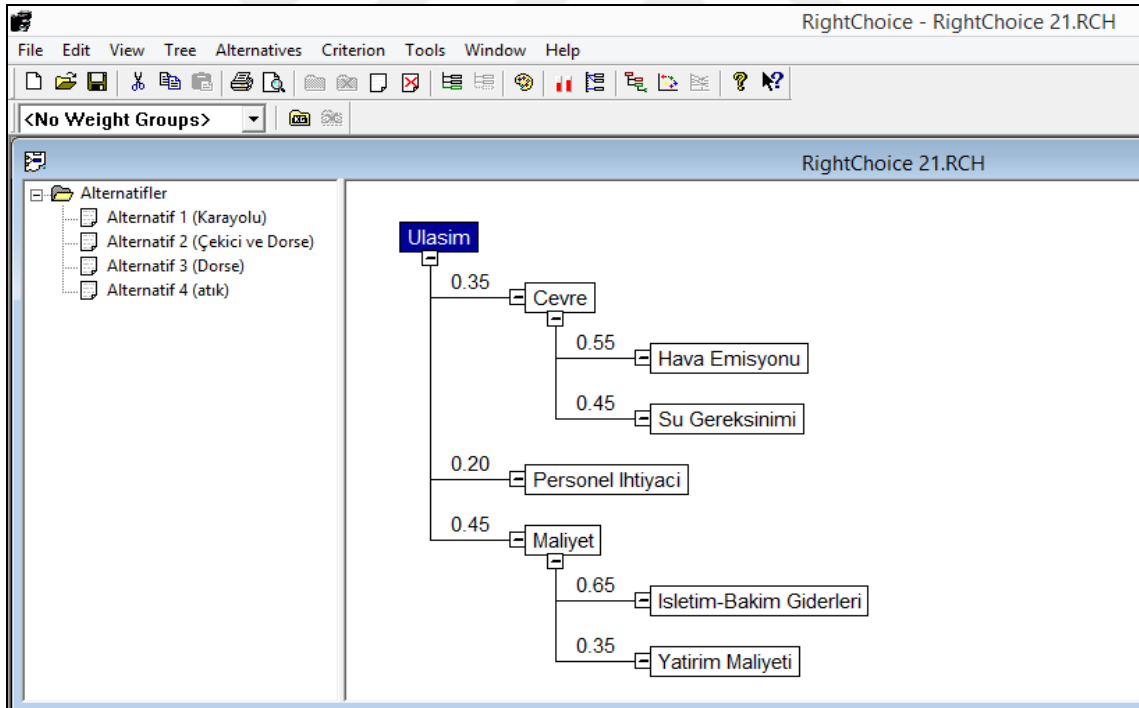
Karar ağacında yer alan ölçütlerin göreceli önem derecelendirmesi, Çizelge 4.7’te verilen anketin sonuçlarına göre, üst ölçütler için çevre (%35), personel ihtiyacı (%20), ekonomi (%45) olarak belirlenmiştir. Alt ölçütlerde bu derecelendirme, hava emisyonu (%55), su gereksinimi (%45), işletme-bakım giderleri (65%), yatırım maliyeti (%35) olarak elde edilmiştir.

## 5.3 Sınır Analizi

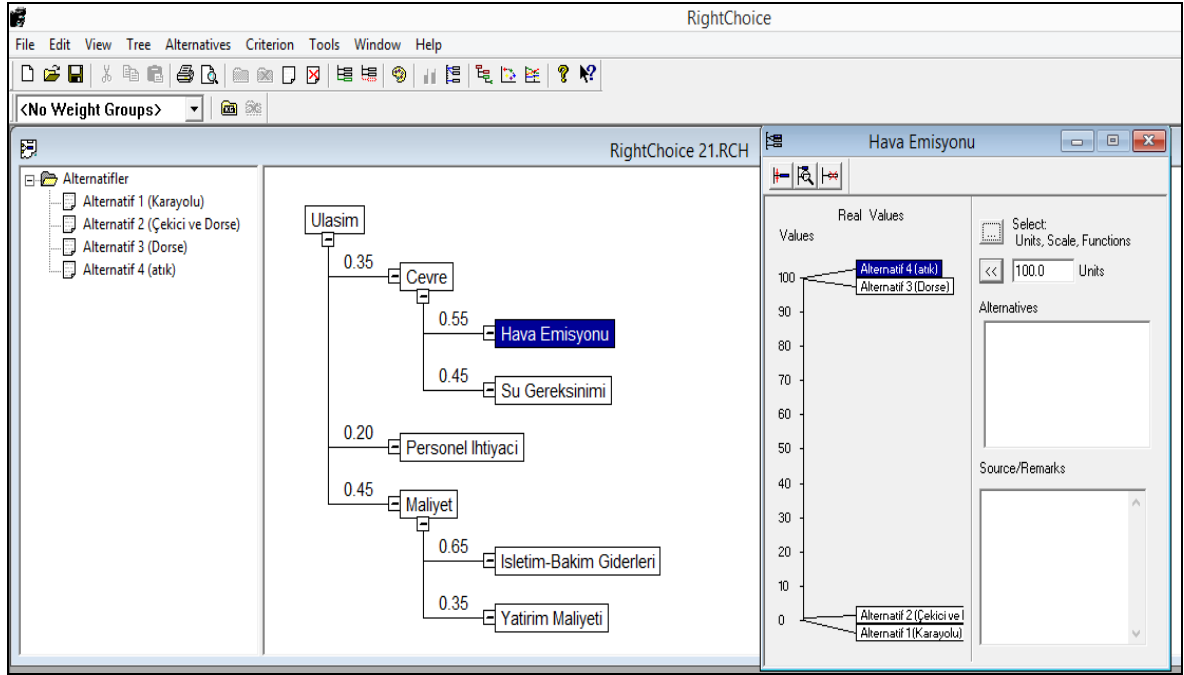
Analizi başlatmak için öncelikle tüm ölçütlerin göreceli önem değerleri, Şekil 5.1’deki gibi modele girilmiştir. Daha sonra, alternatifler modelde tanımlanmıştır (Şekil 5.2). Bu alternatiflerin ölçütler üzerindeki performanslarının (Bölüm 5.1’de verildiği üzere) Şekil 5.3’de gösterildiği gibi modele girilmesiyle veri girişi tamamlanmıştır.



Şekil 5.1. Modelde göreceli önem değerleri

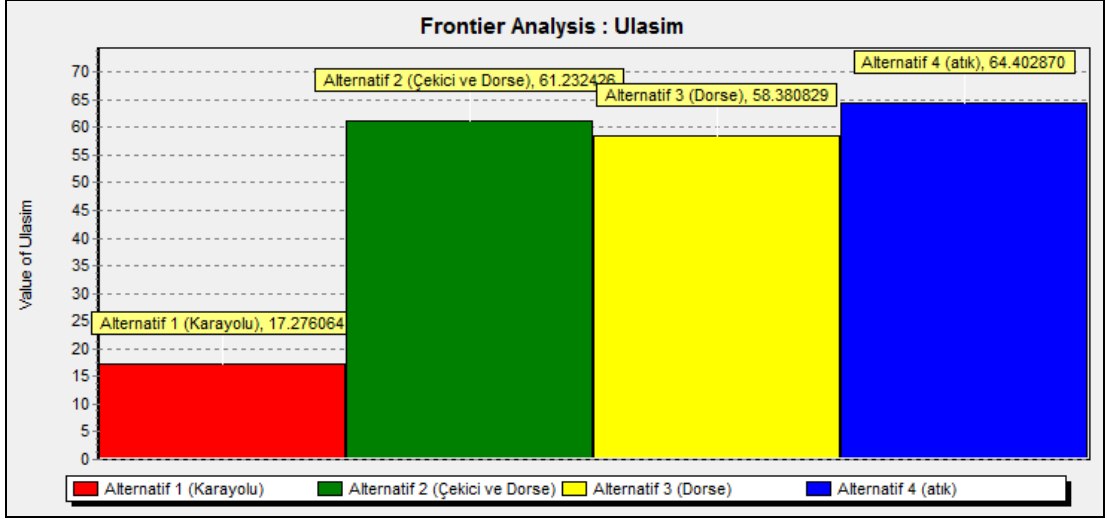


Şekil 5.2. Modelde atık taşıma alternatiflerinin tanımlanması



Şekil 5.3. Alternatiflerin ölçütler üzerindeki performans değerlerinin tanımlanması

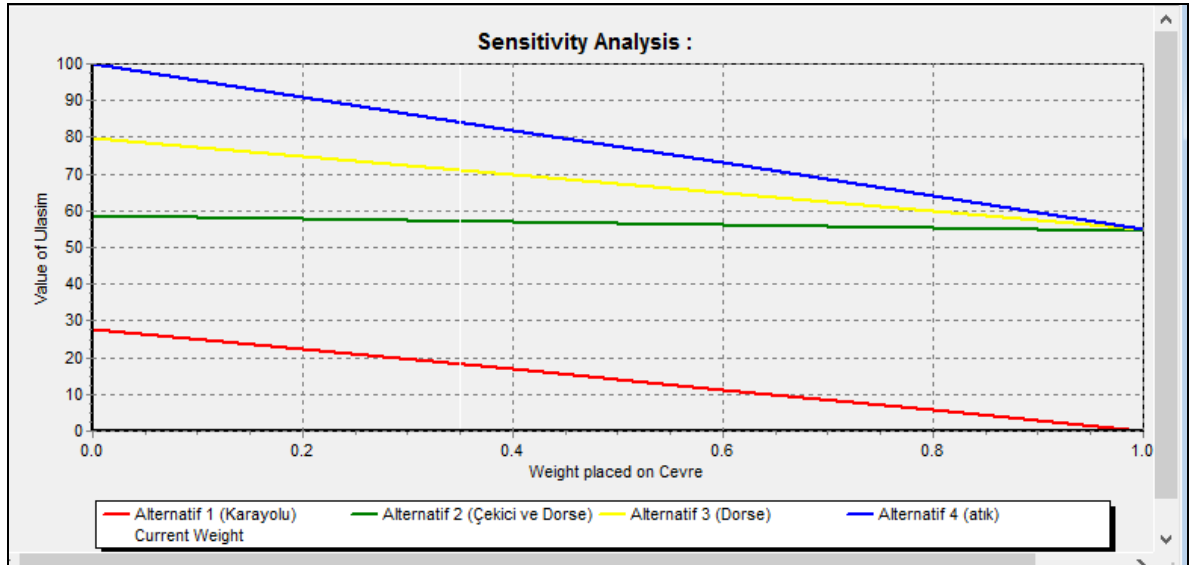
Model yukarıda tanımlanan alternatifler için belirlenen veriler ile çalıştırılarak elde edilen sonuçlar, Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Maliyet, personel ihtiyacı ve çevrenin belirlenen ağırlıkları altında (maliyet: 0.45; personel ihtiyacı: 0.20; çevre: 0.35), Alternatif 4, 2 ve 3 iyi performans (sırasıyla yaklaşık %64, %61 ve %58) gösterirken, Alternatif 1, %17 ile en düşük performansa sahiptir. Bu durum, Alternatif 4, 2 veya Alternatif 3'ün, ölçütler için verilen göreceli önem ağırlıklarına bağlı olarak optimum çözüm olma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.4. Sınır Analiz Sonuçları

## 5.4 Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, belirlenecek olan optimum alternatifin, karar ağacındaki herhangi bir ölçütün ağırlığına olan duyarlılığını belirlemek için yapılmaktadır. Şekil 5.5'teki dikey beyaz çizgi, çevrenin, maliyet ve personel ihtiyacına karşı başlangıçtaki ağırlığı olan 0.35'i göstermektedir. Bu dikey çizginin sağına hareket etmek, çevrenin, diğer iki ölçüte karşı ağırlığının artması (çevrenin, maliyete ve personel ihtiyacından daha önemli olması) anlamına gelmektedir.



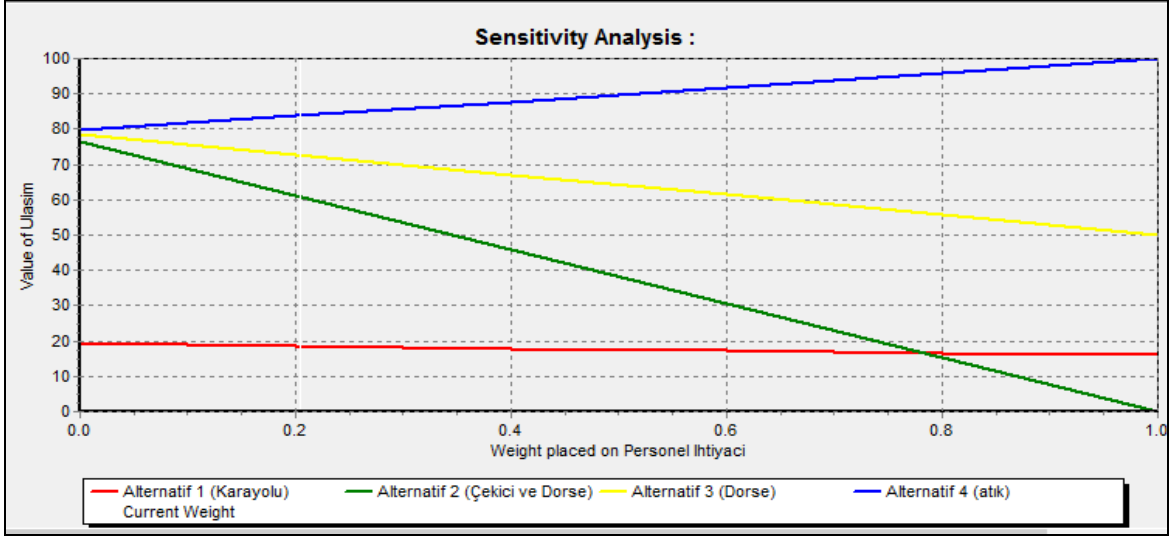
Şekil 5.5. Çevre ölçütünün duyarlılık analizi

Şekil 5.5 çevre ölçütünün ağırlığının, personel ihtiyacı ve maliyete karşı %95'in altında kaldığı sürece, Alternatif 4'ün, diğer tüm alternatiflerden daha üstün performans gösterdiği görülmektedir. Çevre ölçütünün önem ağırlığı %95'in üzerinde ise, düşük hava emisyonu ve düşük işletme-bakım performansı nedeniyle Alternatif 3 ve 2, Alternatif 4 ile kesişerek onunla aynı oranda yüksek performans göstermektedir. Bunun yanı sıra, çevrenin, maliyet ve personel ihtiyacına karşı göreceli önem derecesi ne olursa olsun, yüksek maliyet ve çevre yükü içermesi sebebiyle, Alternatif 1'in uygun çözüm olmayacağı Şekil 5.5'te görülmektedir.

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 sırasıyla personel ihtiyacı ve maliyet ölçütlerinin duyarlılık analiz sonuçlarını göstermektedir. Burada, duyarlılık analizi yapılan ölçütün göreceli önemi grafiklerde y eksenini boyunca değişirken, bu ölçüt dışındaki diğer üç ölçütün göreceli önemi birbirlerine göre aynı kalır. Örneğin, personel ihtiyacının önemi %20'den %30'a çıkarsa (%10 artış), maliyet ve çevrenin önemi sırasıyla %40 ve %30'a gerileyecektir. Bir diğer deyişle personel ihtiyacı ölçütündeki %10'luk artış, model yazılımında diğer iki ölçüte eşit bir düşüş olarak yansıtılmaktadır.

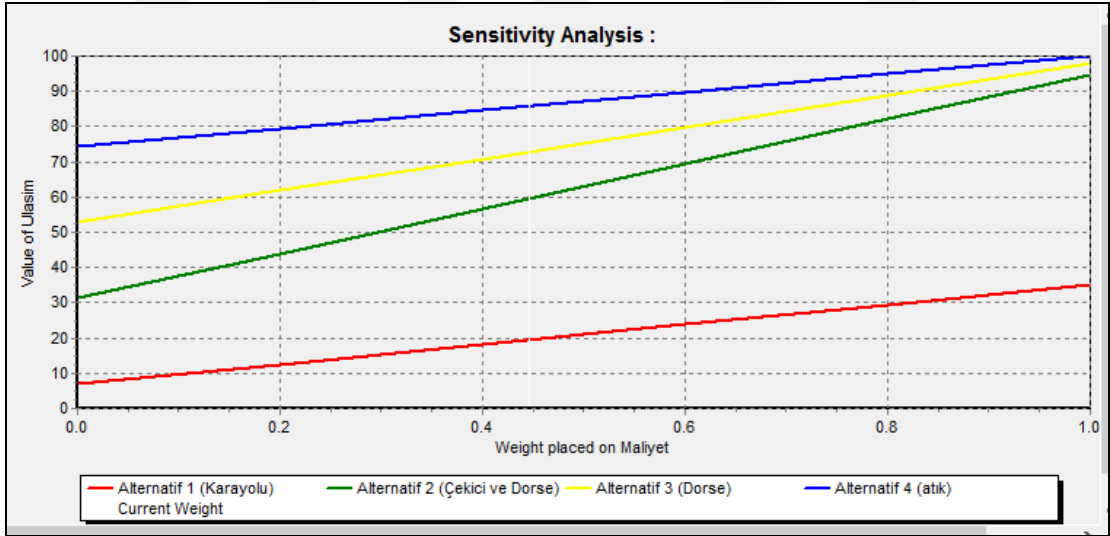
Buna göre personel ihtiyacı ölçütüne atanan göreceli önemden bağımsız olarak en uygun alternatifin, Alternatif 4 olduğu görülmektedir. Bu önem derecesi azaldıkça Alternatif 3, Alternatif 4'e yaklaşmaktadır (Şekil 5.6). Bu durum, personel ihtiyacının öneminin azalması ile çevre ve maliyetin öneminin artması ve Alternatif 3'ün çevresel ölçütler içinden hava emisyonu salınımında ve maliyet ölçütü içinde işletme-bakım maliyeti açısından Alternatif 4'e yakın oranda iyi performans göstermesi ile açıklanmaktadır (Çizelge 5.1, Çizelge 5.2). Şekil 5.6'ya göre, personel ihtiyacı ölçütünün diğer ölçütlere (çevre ve maliyet) göre göreceli öneminin %78'dan fazla olması halinde, Alternatif 1, Alternatif 2'nin performansının önüne geçebilmektedir.





Şekil 5.6. Personel ihtiyacı ölçütünün duyarlılık analizi

Şekil 5.7’de verilen maliyet ölçütünün duyarlılık analizi sonuçlarına göre, Alternatif 4 yine optimum seçenek olarak karşımıza çıkarken, Alternatif 3 ona yakın bir diğer seçenek olarak belirmektedir. Alternatif 1 ve 2 ise, ancak Alternatif 3 ve 4’ün yer almadığı bir seçim ortamında değerlendirilecek seçenekler olarak kalmaktadır.



Şekil 5.7. Maliyet ölçütünün duyarlılık analizi

Sonuç olarak, Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 birlikte değerlendirildiğinde, Alternatif 4’ün her üç ölçüt için de en iyi performansı gösterdiği görülmektedir. Alternatif 3’ün ise, özellikle çevrenin önem derecesinin artmasıyla Alternatif 4’e yaklaştığı, ancak personel ihtiyacının önem derecesinin artmasıyla Alternatif 4’ten uzaklaştığı görülmektedir (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5). Bunun sebebinin, çevre açısından Alternatif 3’ün, Alternatif 4 gibi yüksek

performans gösterirken, personel ihtiyacı bakımından dezavantajlı olmasından ileri gelmektedir (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5). Alternatif 2'nin ise personel gereksinimi ölçütünde nispeten iyi bir performans (16%-Çizelge 5.2) gösterse dahi, düşük çevre ve maliyet performansı sebebiyle, diğer alternatiflerin önüne geçemediği görülmektedir.

Bu proje sonuçları, karar ağacındaki ölçütlerin puanlanmasına bağlı olarak, Alternatif 4 veya 3'ün diğer alternatifler arasında optimum bir seçim olabileceğini göstererek alternatiflerin sayısını azaltmakta ve iyi performans gösterenleri ön plana çıkarmaktadır.

## 5.5 Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, atıkların demiryolu ve karayolu ile taşınmasına ilişkin alternatifler tanımlanarak, bu alternatiflerin, maliyet, çevre ve personel ihtiyacı kapsamında, çok ölçütlü karar verme analizi kullanılarak, Right Choice modeli ile karşılaştırması yapılmıştır. Model için gerekli veriler anket ve kaynak taraması ile elde edilmiştir. Bu kapsamda, atık taşımacılığının karayolu ile yapılması, Alternatif 1 ile gösterilirken, demiryolu ile yapılması, Alternatif 2 (dorse ve çekici ile birlikte), Alternatif 3 (sadece dorse) ve Alternatif 4 (sadece atık) ile temsil edilmiştir. Sonuç olarak, Alternatif 4 ile belirtilen atıkların transferinin sadece atıkların vagonlara yüklenerek (çekici ve dorse kullanılmadan) yapılması belirlenen ölçütlere göre optimum seçenek olarak belirlenmiştir.

Buna göre, Alternatif 4'ün optimum olarak belirlenmesinde, bu alternatifin işletme-bakım maliyetinin düşük olması, bir diğer deyişle bu ölçüt üzerinde yüksek performans göstermesi (Çizelge 5.1) ve işletme-bakım maliyetinin paydaşlar tarafından yüksek göreceli önem ile derecelendirilmesi önemli rol oynamaktadır. Aynı şekilde, Alternatif 4 için gerekli personel sayısı diğer alternatiflere göre düşüktür (Çizelge 5.3). Bu sonuçlar, Yeni Zelanda'da farklı atık taşıma alternatiflerinin karşılaştırıldığı çalışma sonuçları ile tutarlılık göstermektedir (Schriiffer, 2006). Katı atıkların, Christchurch aktarma istasyonundan Kate Valley düzenli depolama sahasına demiryoluyla taşınmasının, karayoluna kıyasla daha ekonomik ve çevresel olduğunun tespit edildiği bu çalışmaya göre, atık transferi için demiryolu seçeneğinin kullanılmasının karayoluna göre en büyük avantajlarından biri işletme maliyetinin ve personel ihtiyacının düşük olmasıdır.

Alternatif 4'ün optimum seçenek olarak belirlenmesi, literatürde açıklandığı gibi, atıkların demiryolu ile taşınmasının çok daha çevreci ve ekonomik olduğunu gösteren çalışmaların sonuçları ile örtüşmektedir (Bauerlein ve King, 2018; Peirce ve Pierson, 1983;

Peterson, 1996). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, evsel atıkların taşınması için yenilikçi demiryolu vagonlarının geliştirilmesine yönelik çalışmaların döngüsel ekonomiye katkı sağlayacağını belirttiği, Vidovic vd. (2022) tarafından yapılan çalışmayı desteklemektedir.

Karar verme faaliyetine bağlı etmenlerin birçoğunun gelecekte ne kadar önemli olacağını belirlenmesi kolay değildir. Bu çalışmada oluşturulan karar ağacının (Şekil 4.1), değişen ve gelişen karar verme süreçlerinden etkilenmesi ve gelecekte daha fazla faktör içerecek şekilde tekrar yapılması mümkündür. Örneğin, atık taşımacılığında zaman faktörünün daha önemli hale gelmesi, ya da kaza riskinin (özellikle de tehlikeli atık taşımacılığında) demiryolu taşımacılığında daha az olmasının önemi fark edildikçe karar ağacının da değişimi kaçınılmaz olacaktır. Bu sebeple, önerilen herhangi bir atık taşıma sisteminin değerlendirilmesinde kullanılacak her bir ölçütün ağırlığı belirsizdir. Bu çalışmada yapılan duyarlılık analizi, bu kapsamda, paydaşlara değişen bu şartlar için kullanılacak yöntem hakkında yol göstermesi bakımından önemlidir.

Bu çalışmada kullanılan yöntem ve model yapısının, ülkemizde başka bölgelerde benzer sorunların araştırılmasında, o bölgeye adapte edilerek tekrar kullanılmasının, paydaşların, atık taşımacılığı gibi karmaşık bir probleme olan algısını arttırması bakımından faydalı olacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Agha, S. H. (2006). Optimizing routing of municipal solid waste collection vehicles in deir El-Babal – Gaza Strip. *The Islamic University Journal (Series of Natural Studies and Engineering)*, 14(2), 75-89. Erişim Adresi <https://journal.iugaza.edu.ps/index.php/IUGNS/article/viewFile/1602/1533>
- American Public Works Association. (1973). *Rail Transport of Solid Wastes*. Erişim Adresi: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/9100OH3V.PDF?Dockey=9100OH3V.PDF>
- Apaydın, O. and Gonullu, M. T. (2007). Route optimization for solid waste collection: Trabzon (Turkey) Case Study. *Global NEST Journal*, 9(1), 6-11. doi:<https://doi.org/10.30955/gnj.000388>
- Bauerlein, V. and King, K. (2018). New York City's Sewage Shipment Runs Afoul in Rural South. *The Wall Street Journal*. Erişim Adresi <https://www.wsj.com/articles/new-york-citys-sewage-shipment-runs-afoul-in-rural-south-1522402201>
- Campos, J., de Rus, G. and Barron, I. (2007). A review of HSR experiences around the world. In *Economic Analysis of High Speed Rail in Europe* (1-26). Germany: BBVA Fundacion.
- Christensen, T. H., Damgaard, A., Levis, J., Zhao, Y., Björklund, A., Arena, U., . . . Bisinella, V. (2020). Application of LCA modelling in integrated waste management. *Waste Management*, 118, 313-322. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.034>
- Dalla Chiara, B., De Franco, D., Coviello, N., and Pastrone, D. (2017). Comparative specific energy consumption between air transport and high-speed rail transport: A practical assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 227-243. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.006>
- Devlet Demiryolları Genel Müdürlüğü Araştırma Planlama Koordinasyon Daire Başkanlığı. (2003). *Maden Taşımacılığında Demiryolu-Karayolu Karşılaştırması*. Erişim Adresi [http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/2cd63cb189c30ed\\_ek.pdf](http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/2cd63cb189c30ed_ek.pdf)
- Ding, Z., Cao, X., Wang, Y., Wu, H., Zuo, J. and Zillante, G. (2022). Cost-benefit analysis of demolition waste management via agent-based modelling: A case study in Shenzhen. *Waste Management*, 137, 169-178. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.036>
- Eisted, R., Larsen, A. W. and Christensen, T. H. (2009). Collection, transfer and transport of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contribution. *Waste Management & Research*, 27(8), 738-745. doi:10.1177/0734242x09347796
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2013). *Enerji Yoğunlukları ve Enerji Verimliliği İstatistikleri*.
- Eriksson, L., Jaworska, J., Worth, A. P., Cronin, M. T. D., McDowell, R. M. and Gramatica, P. (2003). Methods for reliability and uncertainty assessment and for applicability evaluations of classification- and regression-based QSARs. *Environmental Health Perspectives*, 111(10), 1361-1375. doi:10.1289/ehp.5758

- European Commission Directorate-General for Mobility and Transport. (2015). *EU transport in figures: statistical pocketbook 2015*: Luxembourg: Publication Office of European Union.
- Finnmoller. (2010). *HGK (Häfen und Güterverkehr Köln) DE 86 (MaK DE 1002, aka 272 024) with AWB freight cars in Köln West*. Erişim Adresi <http://www.finnmoller.dk/rail-de/vosslloh/hgk-de86.htm>
- Gerçek, H. (2001). Otoyolların Mali ve Ekonomik Değerlendirilmesi. In *5. Ulaştırma Kongresi Bildiriler Kitabı* (89-100). İstanbul: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi.
- Giunta, M., Lo Bosco, D., Leonardi, G. and Scopelliti, F. (2019). Estimation of Gas and Dust Emissions in Construction Sites of a Motorway Project. *Sustainability*, 11(24), 7218. Erişim Adresi <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/24/7218>
- Goulart Coelho, L. M., Lange, L. C. and Coelho, H. M. (2017). Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods. *Waste Management & Research*, 35(1), 3-28. doi:10.1177/07342424x16664024
- Haul, R. (2004). *Collection*. Forester Media. Erişim Adresi: <https://www.mswmanagement.com/collection/article/13002918/rail-haul>
- Hung, M.-L., Ma, H.-w. and Yang, W.-F. (2007). A novel sustainable decision making model for municipal solid waste management. *Waste Management*, 27(2), 209-219. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.01.008>
- Inghels, D., Dullaert, W. and Vigo, D. (2016). A service network design model for multimodal municipal solid waste transport. *European Journal of Operational Research*, 254(1), 68-79. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.036>
- Kabasakal, A. ve Solak, A. O. (2009). Demiryolu Sektörünün Rekabete Açılması. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 25, 27-34. Erişim Adresi <https://library.dogus.edu.tr/mvt/pdf.php>
- Kabasakal, A. ve Solak, A. O. (2010). *Demiryolu ve Karayolu Ulaştırma Sistemlerinin Ekonomik Etkinlik Analizi*. Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 10(1), 123-136. Erişim Adresi <https://www.acarindex.com/dosyalar/makale/acarindex-1423869522.pdf>
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2009a). *Karayolu Planlaması Bilgileri El Kitabı*.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2009b). *2008 Yılı Otoyollar Bakım-İşletme ve Ücret toplama Maliyetleri*.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2009c). *2008 Yılı Devlet ve İl Yolları Bakım-İşletme Maliyetleri*.
- Keirstead, J., Jennings, M. and Sivakumar, A. (2012). A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3847-3866. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>

- Kulcar, T. (1996). Optimizing solid waste collection in Brussels. *European Journal of Operational Research*, 90(1), 71-77. doi:[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00311-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00311-4)
- Levinson, D. M., Mathieu, J.-m., Gillen, D. and Kanafani, A. (1997). The full cost of high-speed rail: an engineering approach. *The Annals of Regional Science*, 31, 189-215.
- Li, D. and Lasenby, J. (2022). Mitigating urban motorway congestion and emissions via active traffic management. *Research in Transportation Business & Management*, 100789. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100789>
- Lombardi, L., Tribioli, L., Cozzolino, R. and Bella, G. (2017). Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(12), 1989-2006. doi:10.1007/s11367-017-1294-y
- Mısır, S. O. (2015). *Kentsel Katı Atıkların Taşınması ve Transferi* (Bitirme Tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Samsun.
- Morrissey, A. J. and Browne, J. (2004). Waste management models and their application to sustainable waste management. *Waste Management*, 24(3), 297-308. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2003.09.005>
- Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H. and Bräysy, O. (2006). Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications*, 30(2), 223-232. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.07.009>
- Or, I. and Curi, K. (1993). Improving The Efficiency Of The Solid Waste Collection System In İzmir, Turkey, Through Mathematical Programming. *Waste Management & Research*, 11(4), 297-311. doi:<https://doi.org/10.1006/wmre.1993.1032>
- Özelleştirme İdaresi Başkanlığı (ÖİB) (2007). *Otoyollar ve Köprülerin Özelleştirilmesi Ön Tanıtım Dokümanı*. Erişim Adresi [https://www.oib.gov.tr/2007/Ontanitim\\_Dokuman%C4%B1\\_Temmuz2007.pdf](https://www.oib.gov.tr/2007/Ontanitim_Dokuman%C4%B1_Temmuz2007.pdf)
- Özkan, A. (2008). *Utilization of different decision making techniques for development of municipal solid waste management systems*. (PhD Thesis). Graduate School of Sciences, Environmental Engineering Programme. Anadolu University, Eskişehir.
- Öztürk, O. ve Öztürk, O. (2018). Demiryolu Denizyolu ve Karayolunun Ülkemizde Enerji Tüketimi ve Çevresel Etkiler Açısından Karşılaştırılmaları. *International Symposium On Railway System Engineering* (43-53), Karabük, Türkiye.
- Peirce, J. J. and Pierson, B. A. (1983). Analysis of Rail Transfer for Solid Wastes in North Carolina, U.S.A. *Waste Management & Research*, 1(1), 127-138. doi:10.1177/0734242x8300100115
- Peterson, C. (1996). Rail Transport of Municipal Waste Within the United States. *Waste Management & Research*, 14(3), 319-325. doi:10.1177/0734242x9601400307
- Rados, B. (2021). *How rail freight can play a vital role in transporting hazardous COVID-19 waste*. Erişim Adresi <https://www.globalrailwayreview.com/article/120829/rail-freight-covid-19-waste/>

- Rafew, S. M. and Rafizul, I. M. (2021). Application of system dynamics model for municipal solid waste management in Khulna city of Bangladesh. *Waste Management*, 129, 1-19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.059>
- Rail Cargo Group. (2021). *More waste transports to be handled by rail in future*. Erişim Adresi <https://www.railcargo.com/en/news/more-waste-transport-to-be-handled-by-rail-in-future>
- Ratcliffe, D. (2019). *Freight Focus: Fragrant world of the 'Binliner'*. Erişim Adresi <https://www.therailwayhub.co.uk/3643/freight-focus-fragrant-world-of-the-binliner/>
- Rızvanoğlu, O., Kaya, S., Ulukavak, M. and Yeşilnacar, M. İ. (2019). Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes, through linear programming and geographic information system: a case study from Şanlıurfa, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1), 9. doi:10.1007/s10661-019-7975-1
- Schriiffer, B. (2006). *Transport Of Christchurch Solid Waste Road Transport Versus Rail Transport*. (Master Thesis). Lincoln University, New Zealand. Erişim Adresi <https://core.ac.uk/download/pdf/35463996.pdf>
- Sezer, F. E. (2019). *İstanbul'un Avrupa Yakasında Oluşan Katı Atıkların Demiryoluyla Taşınması Üzerine Bir Araştırma*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Solak, A. O. (2011). *Karayolu ve Demiryolu Ulaşım Sistemlerinin Ekonomik Etkinlik Analizi*. (Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sakarya.
- Solak, A. O. (2013). Türkiye'de Ulaştırma Sektörü Enerji Tüketiminin Azaltılması: Bir Senaryo Yaklaşımı. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 9(1), 125 - 141.
- Somplak, R., Prochazka, V., Pavlas, M. and Popela, P. (2013). The Logistic Model for Decision Making in Waste Management. *Chemical engineering transactions*, 35, 817-822. doi:<https://doi.org/10.3303/CET1335136>
- Sukholthaman, P. and Sharp, A. (2016). A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. *Waste Management*, 52, 50-61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.026>
- The Odour Unit Pty Ltd. (2019). *Clyde Odour Audit - Report XXXIII*. Erişim Adresi <https://www.veolia.com/anz/sites/g/files/dvc2011/files/document/2019/10/Veolia%20Clyde%20Audit%20XXXIII.pdf>
- Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD). (2009). *Kuruluşumuzun Geleceğe Yönelik Projeleriyle İlgili Sunum*. Erişim Adresi <http://www.tcdd.gov.tr>
- Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD). (2019). *Yük Vagon Rehberi*. Erişim Adresi [https://www.tcdtasimacilik.gov.tr/uploads/images/2019/vg%20rehberi%20d%C3%BCzenleme%2006\\_2019.pdf](https://www.tcdtasimacilik.gov.tr/uploads/images/2019/vg%20rehberi%20d%C3%BCzenleme%2006_2019.pdf)

- Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (2022). *Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tablolari*. Erişim Adresi <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2022). *Motorlu Kara Taşıtları, Nisan 2022*. Erişim Adresi <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Nisan-2022-45707>
- Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı. (2011). *Transportation in Turkey, Country Report*. Erişim Adresi <http://www.comcec.org/wpcontent/uploads/2015/02/Turkey.pdf>
- Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı. (2012). *Araçların Yüklenmesine İlişkin Ölçü Ve Usuller ile Tartı ve Boyut Ölçüm Toleransları Hakkında Yönetmelik*. Erişim Adresi <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/11/20121108-7.htm>
- Uysal, O. (2015a). *Sopron-Halkalı Rola Seferleri Başlıyor*. Rail Turkey Haber. Erişim Adresi <https://railturkeyhaber.wordpress.com/2015/11/17/sopron-halkali-rola-seferleri-basliyor/>
- Uysal, O. (2015b). *Dorse treni savaşları*. Rail Turkey. Erişim Adresi <https://tr.railturkey.org/2015/01/07/dorse-treni-savaslari/>
- Vego, G., Kučar-Dragičević, S. and Koprivanac, N. (2008). Application of multi-criteria decision-making on strategic municipal solid waste management in Dalmatia, Croatia. *Waste Management*, 28(11), 2192-2201. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.002>
- Ventana Systems UK. (2022). *Rightchoice*. Erişim Adresi <https://www.ventanasystems.co.uk/services/software/rightchoice/>
- Veolia. (2022). *Clyde Transfer Station, NSW*. Erişim Adresi <https://www.veolia.com/anz/our-services/our-facilities/transfer-stations/clyde-transfer-station>
- Vidovic, D., Niksic, M. and Susak, M. (2022). Development of Innovative Rail Wagons for Transport of Municipal Waste “EKO-VAKO”. In M. Petrovic, L. Novacko, D. Bozic and T. Rozic (Eds.), *The Science and Development of Transport—ZIRP 2021* (155-165). Cham: Springer International Publishing.
- Wang, Y.-Z., Zhou, S. and Ou, X.-M. (2021). Development and application of a life cycle energy consumption and CO2 emissions analysis model for high-speed railway transport in China. *Advances in Climate Change Research*, 12(2), 270-280. doi:<https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.02.001>
- Waste Management Solutions. (2022). *WasteByRail Waste Transportation Services*. Erişim Adresi <https://www.wmsolutions.com/solutions/wastebyrail/>
- Wastebits. (2022). *WMI / Long Island Transfer Station (Varick 2)*. Erişim Adresi <https://wastebits.com/locator/location/wmi-long-island-transferstation-varick-2>
- West London Waste. (2022). *Victoria Road Waste Transfer Station*. Erişim adresi <https://westlondonwaste.gov.uk/about-us/where-your-waste-goes/victoria-road-waste-transfer-station/>
- Yadav, V., Kalbar, P. P., Karmakar, S. and Dikshit, A. K. (2020). A two-stage multi-attribute decision-making model for selecting appropriate locations of waste transfer stations in



urban centers. *Waste Management*, 114, 80-88.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.024>

Yaşar, B. ve Eren, Ö. (2008). Türkiye'de Tarım Sektöründe Kullanılan Petrodizelin Çevresel Etkileri ve Biyodizel Alternatifiyle Karşılaştırılması. *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı* (83-90), İstanbul.

Yıldız-Geyhan, E., Altun-Çiftçioğlu, G. A. and Kadırgan, M. A. N. (2017). Social life cycle assessment of different packaging waste collection system. *Resources, Conservation and Recycling*, 124, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.04.003>

Zhang, Y., Huang, G. H. and He, L. (2014). A multi-echelon supply chain model for municipal solid waste management system. *Waste Management*, 34(2), 553-561. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.002>



## **TEZDEN ÜRETİLMİŞ ESERLER**

### **A. Uluslararası Hakemli Makaleler**

Kamaoğlu F., Aydın, N., A Decision-Making Model for the Transportation of Municipal Solid Wastes, Journal of Natural Hazards and Environment (In-Review)

### **B. Uluslararası Konferans Bildirileri**

Kamaoğlu, F. ve Aydın, N. (2021). *Entegre Atık Yönetim Faaliyetleri İçin Alternatif Taşıma Yöntemleri*. 2. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi, Online.

