

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SÜRDÜRÜLEBİLİR ATIK YÖNETİMİ İÇİN TERSİNE
LOJİSTİK AĞ TASARIMI: ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON
MODELİ

Eda ER TUNCER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DOÇ. DR. AYŞENUR BUDAK

ŞUBAT 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SÜRDÜRÜLEBİLİR ATIK YÖNETİMİ İÇİN TERSİNE
LOJİSTİK AĞ TASARIMI: ÇOK AMAÇLI
OPTİMİZASYON MODELİ

Eda ER TUNCER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DOÇ. DR. AYŞENUR BUDAK

ŞUBAT 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**REVERSE LOGISTICS NETWORK DESIGN MULTI-
OBJECTIVE OPTIMIZATION MODEL FOR
SUSTAINABLE WASTE MANAGEMENT**

Eda ER TUNCER

A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING

ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. AYŞENUR BUDAK

FEBRUARY 2024



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 19/02/2024 tarih ve 2024/15 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 08/03/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Eda ER TUNCER'in tez çalışması Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Yüksek Lisans Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Ayşenur BUDAK

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Ayşe CİLACI TOMBUŞ

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Veysel ÇOBAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

İthaf / Dedication

Aileme

ve

biricik eşime

ÖZET

Tez çalışması, Eskişehir'deki tıbbi atık yönetiminde tersine lojistik zorluklarını ele almaktadır. Odunpazarı ve Tepebaşı ilçelerindeki 9 büyük hastaneden tıbbi atıkların toplanması ve bertarafına odaklanmaktadır. Patolojik atıkların Ankara'daki bir yakma tesisine taşınmasıyla Eskişehir'de yerel bir yakma tesisi kurmanın fizibilitesi incelenmiştir. Bu çalışma, atık taşımacılığındaki tersine lojistiğin kritik rolünü vurgulayarak, her iki tür tıbbi atığın da dikkate alındığını göstermektedir. Modelde, tıbbi atıkların bertarafı için çok amaçlı bir optimizasyon modeli formüle edilmiştir. MINLP (Karışık Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama) modeli kullanılarak GAMS'te (Genelleştirilmiş Cebirsel Modelleme Sistemi) çözüme ulaşılmıştır. Amaçlar, ekonomik ve çevresel boyutları kapsamaktadır; ekonomik amaç, sabit kurulum, taşıma, operasyon ve CO₂(e) emisyonu maliyetlerinin en aza indirgenmesini içerirken, çevresel amaç, CO₂(e) emisyonunun en aza indirilmesini hedefler. Eskişehir'deki 9 büyük hastanenin gerçek tıbbi atık verileri modele entegre edilmiş olup, sterilizasyon tesisleri, depolama sahaları ve önerilen yakma tesisleri gibi mevcut altyapılarla birlikte ele alınmıştır. Amaç fonksiyonlarına eşit ağırlık verildiğinde, patolojik atıkların bertarafı için mevcuttaki sürecin uygun olduğu görülmüştür. Simülasyonlar, mevcut sterilizasyon ve Ankara'daki yakma tesislerinin 10 yıl boyunca yeterli kapasiteye sahip olduğunu göstererek her iki tıbbi atık türündeki artışı başarıyla yönetebileceğini ortaya koymaktadır. Araştırmada, farklı tıbbi atık miktarları, maliyetler ve emisyon salınımı gibi değişkenlerle beş farklı senaryo incelenmiştir. Amaç fonksiyonlarına atanan farklı ağırlıkların etkisini değerlendirmek için çeşitli senaryolar kullanılmıştır. Böylelikle, karar vericilerin maliyet ve emisyon salınımı gibi faktörlere verdikleri önemin sonuçları üzerinde daha kesin bir düşünceye sahip olmaları sağlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, Eskişehir'de ekonomik olarak yakma tesisi kurmanın, CO₂(e) emisyonu salınımı amaç fonksiyonuna minimum önem verildiğinde mümkün olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, amaç fonksiyonlarına atanan farklı ağırlıkların etkisini değerlendirmek için senaryolar içinde denemeler yapılmıştır. Bu senaryolar sonucunda maliyet ve emisyon minimizasyonunun eşit önemde olduğu kabulü ile mevcut durumun yaklaşık 17 yıl boyunca optimal olarak devam etmesi gerektiği, fakat tıbbi atık miktarlarında yüksek artışa sebebiyet verecek durumlarda Eskişehir tesisleşmesinin yakın gelecekte optimal olacağı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde maliyet minimizasyonunun daha önemli olduğu kabulü ile Eskişehir için önerilen tesisleşmenin 8 yıl içerisinde optimal bir seviyeye geleceği gözlemlenmiştir. Bu veriler ışığında, karar vericiler sonuçları önceliklerine göre daha net analiz edebilir. Tüm sonuçlar incelendiğinde, Eskişehir'de ekonomik olarak yakma tesisi kurmanın, CO₂(e) emisyonu salınımı amaç fonksiyonuna minimum önem verildiğinde mümkün olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tıbbi Atık Yönetimi, Tersine Lojistik, Karışık Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama, Çok Amaçlı Optimizasyon Modeli

ABSTRACT

This study addresses the reverse logistics challenges in medical waste management in Eskişehir. Specifically, it focuses on the collection and disposal of two types of waste, namely cutting-piercing and infectious waste, as well as pathological waste, from nine major hospitals in Odunpazarı and Tepebaşı, the largest districts of Eskişehir. The feasibility of establishing a local incineration facility in Eskişehir by transporting pathological waste to a incineration plant in Ankara has been evaluated. The study underscores the critical role of reverse logistics in waste transportation, demonstrating the consideration of both types of medical waste. The disposal of medical waste is formulated as a multi-objective optimization model, covering economic and environmental aspects. The economic objective entails minimizing costs associated with fixed installation, transportation, operation, and costs caused from CO₂(e) emissions. The environmental objective focuses on minimizing CO₂(e) emissions. The MINLP model was solved using GAMS. Real medical waste data from nine major hospitals in Eskişehir were integrated using mixed-integer nonlinear programming and weighted sum methods. The existing sterilization facility, landfill, proposed incineration facility, and incineration facility in Ankara were incorporated into the model. Simulations indicating that the capacities of sterilization and incineration facilities in Ankara would be sufficient for the next ten years demonstrate the successful management of increasing medical waste in both types. Five scenarios were examined, encompassing various combinations of medical waste quantities, costs, and emission levels. Moreover, various weight values were tested to assess the impact of assigning weights to objective functions. As a result, it was observed that with the assumption of equal importance given to cost and emission minimization, the current situation should optimally continue for approximately 17 years. However, in cases where there would be a significant increase in medical waste, establishment of facilities in Eskişehir would be optimal in the near future. Similarly, assuming that cost minimization is more important, it was observed that the proposed establishment in Eskişehir would reach an optimal level within 8 years. Consequently, decision-makers can more clearly evaluate the implications of their priorities on cost and emission reduction. Evaluation of the model results indicates that establishing an incineration facility in Eskişehir would be economically feasible only when minimum importance is given to CO₂(e) emission reduction in the objective function. This study contributes valuable insights to decision-makers and waste management authorities by offering important information on the optimal allocation of resources for the collection, transportation, and disposal of both types of medical waste, thereby contributing to ongoing debates on sustainable waste management practices in the healthcare sector.

Keywords: Medical Waste Management, Reverse Logistics, Mixed-Integer Nonlinear Programming, Multi-Objective Optimization Model

TEŐEKKÖR

Bu yüksek lisans tezi sürecimde bana her adımda kılavuzluk ederek, büyük bir özveri ve sabırla rehberlik yapan saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Ayşenur Budak’a, bu zorlu süreçte beni her zaman cesaretlendiren, motive eden ve destekleyen sevgili eşim Refik Alper Tuncer'e, son olarak, aileme bu süreçte verdikleri sonsuz destek ve anlayışları için içtenlikle teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar/ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Sürdürülebilirlik	3
1.1.1. Sürdürülebilir Lojistik	4
1.1.1.1. Sürdürülebilir Lojistik İçin Üç Ana Strateji	5
1.2. Literatür Tarama	24
1.2.1. Tersine Lojistik Ağ Tasarımı Çalışmaları	24
1.2.2. Tıbbi Atık Yönetimi ile İlgili Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi	26
1.2.2.1. Tıbbi Atık Tersine Lojistik Ağ Çalışmaları	27
2. METODOLOJİ VE PROBLEM TANIMI	37
2.1. MIP Yöntemleri: MILP ve MINLP	37
2.2. Eskişehir İçin Tıbbi Atık Tersine Lojistik Süreçleri	43
2.2.1 Mevcut Durum Özeti	43
2.2.2. Mevcut Durum ve Önerilen Durum Karşılaştırılması	44
2.2.3. Modelin Genel Varsayımları	47
2.2.4. Matematiksel Model ve Modelin Kurulumu	48
2.2.5. Ağırlıklı Toplam Metodu ve Amaç Fonksiyonu Oluşturulması	50
2.2.6. GAMS'te Modelin Kurulumu	54
2.2.6.1. İndisler	54
2.2.6.2. Parametreler	55
2.2.6.3. Kısıtlar	59
2.2.6.4. Amaç Fonksiyonları	61
2.2.6.5. Verilerin Tayini	64
2.2.6.6. Senaryolar	69
3.SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	96
EKLER	97

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

MINLP	: Karışık Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama
GAMS	: Genelleştirilmiş Cebirsel Modelleme Sistemi
TPS	: Toyota Üretim Sistemi
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
MILP	: Karışık Tam Sayılı Doğrusal Programlama
GIS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
MOPSO	: Çok Amaçlı Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
AUGMECON2	: Geliştirilmiş Bir Epsilon-Kısıtlama Yöntemi
MIP	: Karışık Tam Sayılı Programlama
ALNS	: Uyarlanabilir Büyük Mahalle Araması
IMCGP	: Geliştirilmiş Çoktan Seçmeli Hedef Programlama Yaklaşımı
GAM	: Hedefe Ulaşma Yöntemi
DICOPT	: Ayrık ve Sürekli Optimize Edici
NLP	: Doğrusal Olmayan Programlama
KKT	: Karush–Kuhn–Tucker
KDB	: Kesici - Delici, Bulaşıcı
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Sürdürülebilirliğin bileşenleri	3
Şekil 1.2: İsrafi azaltmak için dört ilke	9
Şekil 1.3: Tersine lojistik operasyonlarındaki iş akış şeması	13
Şekil 1.4: Tersine lojistik hiyerarşisi	14
Şekil 1.5: Yeşil lojistik ile tersine lojistik karşılaştırılması	17
Şekil 1.6: Türkiye’deki tıbbi atık bertaraf tesisleri	23
Şekil 1.7a: Tıbbi atık yönetimi makalelerinin sayısı	27
Şekil 1.7b: Ülkelerdeki yayınların dağılımı	27
Şekil 2.1: DICOPT algoritması akış diyagramı	42
Şekil 2.2: Odunpazarı ve Tepebaşı 2023 mevcut tıbbi atık tersine lojistik süreci	45
Şekil 2.3: Atık üreticilerin, tesislerin, depolama sahasının ve Ankara’nın konumu	45
Şekil 2.4: Odunpazarı ve Tepebaşı için önerilen tıbbi atık tersine lojistik modeli	46
Şekil 2.5: Birleştirilmiş model şematigi	49
Şekil 2.6: Farklı amaç fonksiyonlarının birleştirilmesi	51
Şekil 2.7: Ağırlıklı toplam pareto-optimal çözüm uzayı	54
Şekil 2.8: Eskişehir Şehir Hastanesi – Sterilizasyon tesisi arası mesafe tayini	67
Şekil 2.9: Türkiye’de yıllar içerisinde nüfus ve tıbbi atık miktarı değişimi	68
Şekil 2.10: Senaryo – 1 10 yıl içerisindeki maliyet miktarları	70
Şekil 2.11: Senaryo – 2 Yıllar içinde maliyet artışları	73
Şekil 2.12: Senaryo – 2 Sterilizasyon tesisi açılması	74
Şekil 2.13: Senaryo – 2 Emisyon miktarı ve Eskişehir’de yakma tesisi açılması	75
Şekil 2.14: Senaryo – 3 Maliyet artışı ve Eskişehir’de tesis açılması	76

TABLÖLAR/ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 1.1: Geleneksel lojistik ve yeşil lojistik arasındaki temel farklar	6
Tablo 1.2: Geleneksel lojistik ve yalın lojistik arasındaki farklar	10
Tablo 1.3: Tersine lojistik bileşenleri	12
Tablo 1.4: Tersine ve geleneksel lojistiğin karşılaştırılması	16
Tablo 1.5: Tersine lojistik konulu araştırma makaleleri	16
Tablo 1.6: Tıbbi atıklar için dünya genelinde kullanılan farklı bertaraf yöntemleri	22
Tablo 1.7: Tıbbi atık yönetimi alanında incelenen bazı makaleler	28
Tablo 2.1: GAMS içerisindeki bazı MINLP çözüm yöntemleri	40
Tablo 2.2: Odunpazarı ve Tepebaşı'nda seçilen tıbbi atık üreticileri listesi	44
Tablo 2.3: Eskişehir majör tıbbi atık üreticilerinin 2022 yılı tıbbi atık miktarları	65
Tablo 2.4: Tıbbi atık süreçleri birim ve tesis açılma maliyetleri	65
Tablo 2.5: Birim karbon emisyon miktarları	66
Tablo 2.6: Tesisler arasındaki yolların (km) matrisi	67
Tablo 2.7: 2014 – 2020 Arası TÜİK verilerine göre nüfus ve tıbbi atık artışı	68
Tablo 2.8: Senaryo-1 Ankara ve Eskişehir ortaya çıkan CO ₂ (e) miktarı	71
Tablo 2.9: Senaryo – 2 İlk 9 yıl için maliyet ve emisyon miktarları	72
Tablo 2.10: 2022 Yılı Odunpazarı ve Tepebaşı tozlu gün sayıları	74
Tablo 2.11: Senaryo – 3 Yıllar içerisindeki maliyet ve emisyon değişimleri	77
Tablo 2.12: Senaryo – 4 Yıllar içinde emisyon miktarı değişimi	79
Tablo 2.13: Senaryo – 4 Eskişehir ve Ankara maliyet farkları	80
Tablo 2.14: Senaryo – 5 Eskişehir ve Ankara maliyet ile emisyon farkları	81

1. GİRİŞ

Tersine lojistik, lojistik kavramlarının önemli bir unsuru olarak öne çıkar çünkü atık yönetimi süreçlerini etkinleştirir ve iyileştirir. Geleneksel lojistik, ürünlerin tedarikinden son tüketiciye ulaşmasına odaklanırken, tersine lojistik, ürünlerin geri dönüşümü, yeniden kullanımı veya bertarafını içeren süreçleri yönetir. Bu hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli bir rol oynar çünkü atıkların etkin bir şekilde yönetilmesi, kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar, atık miktarını azaltır ve çevreye olan olumsuz etkileri minimize eder. Bu nedenle, tersine lojistik, sürdürülebilirlik çabalarının bir parçası olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Demirel ve Gökçen (2011)'e göre tersine lojistik konusunda en önemli ve ilgi çekici konulardan biri tersine lojistik ağ tasarımı konusudur. Bu tasarım, atık toplama, taşıma, depolama ve bertaraf süreçlerini optimize etmek için stratejik bir yaklaşım sunar.

Sağlık sektörü, özellikle tıbbi atıkların yönetimi konusunda tersine lojistik ağ tasarımına büyük ihtiyaç duyar. Ertaş ve Güden (2019)'a göre özellikle hastaneler tıbbi atıkların üretilmesinde en büyük kaynaklardandır. Tıbbi atıklar, insan sağlığı ve çevre için ciddi riskler oluşturabileceği için tıbbi atıkların doğru şekilde toplanması, taşınması, depolanması ve bertarafı büyük önem taşır. Ancak, bu süreçler genellikle diğer atık türlerine göre daha karmaşık ve zorlu bir süreçtir. Tıbbi atık tersine lojistik ağ tasarımı, çeşitli operasyonel ve yasal gereksinimleri dikkate almak zorundadır. Ayrıca sürdürülebilirlik ilkeleri olan çevresel, sosyal ve ekonomik boyutları içeren kapsamlı bir yaklaşım gerektirir. Bu nedenle, tıbbi atık tersine lojistik ağ tasarımı, atık yönetimi ve çevresel koruma arasında hassas bir denge kurmayı gerektirir.

Türkiye gibi ülkelerde, tıbbi atık yönetimi konusunda belirli düzenlemeler ve yönetmelikler olmasına rağmen, hala gelişme potansiyeli bulunmaktadır. Türkiye'nin tıbbi atık yönetimi alanında daha ileriye gitmesi ve daha etkili bir tersine lojistik ağ tasarımı sağlaması gerekmektedir.

Bu çalışma, Eskişehir'in Odunpazarı ve Tepebaşı ilçelerinde bulunan 9 büyük hastanenin mevcut durumunu değerlendirmek ve ileriki yıllarda oluşacak tıbbi atıkların etkin yönetimini sağlamak amacıyla bir tersine lojistik ağı tasarlamayı

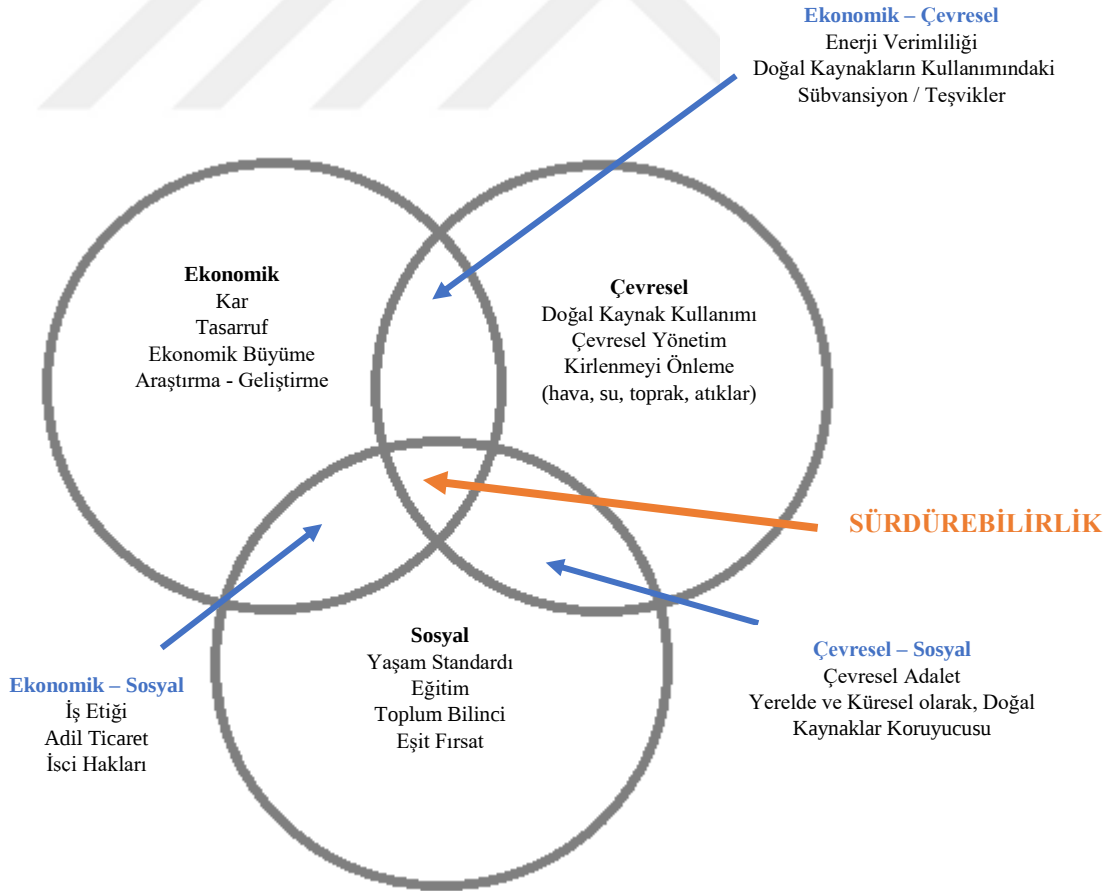
hedeflemektedir. Eskişehir'deki tıbbi atık yönetimi çalışmaları genellikle tıbbi atıkların toplama aşamasına odaklanmıştır, ancak diğer süreçlere ilişkin detaylı analizler eksiktir. Bu tez çalışması, Eskişehir için tıbbi atık yönetiminin tüm aşamalarını (toplama, taşıma, depolama, arıtma (işleme: tıbbi atıkların yakılması, sterilizasyonu), bertaraf) içeren kapsamlı bir değerlendirme sunarak literatüre katkı sağlayacaktır. Ayrıca, Ankara'da bulunan bir bertaraf firmasında gerçekleşen patolojik atık bertaraf işleminin Eskişehir içinde icrasının fizibilitesini araştırmak da bu çalışmanın kapsamındadır. Çalışmanın temel amacı, ekonomik ve çevresel boyutları içeren çok amaçlı bir yaklaşım benimseyerek, sabit kurulum, taşıma, operasyon ve CO₂(e) emisyonu maliyetlerinin en aza indirilmesi ve CO₂(e) emisyonu salınımının en aza indirilmesidir. Bu amaçlar doğrultusunda, Eskişehir'deki mevcut sterilizasyon tesisi, düzenli depolama sahası, önerilen yakma tesisi ve Ankara'daki bertaraf tesisi modelde kullanılmıştır. Model, MINLP modeli olarak geliştirilmiştir. Ayrıca, Genelleştirilmiş Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS 45.5.0) çözücüsü kullanılarak kodlanmış ve en iyi çözüme ulaşılmıştır. Model çözümünde ağırlıklı toplam metodu kullanılarak gerçek tıbbi atık verileri analiz edilmiş ve çeşitli senaryolar incelenerek duyarlılık analizleri yapılmıştır.

Tez çalışmasının temel yapısının belirlenmesi ve modelin geliştirilmesi için literatür taraması ve uzman görüşlerine başvurulmuştur. Ayrıca, tıbbi atık ile ilgili yönetmelikler, Eskişehir'deki çevre kurul kararları ve Eskişehir çevre durum raporları gibi belgeler de incelenmiştir. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi'ne bağlı İklim Değişikliği ve Sıfır Atık Dairesi Başkanlığı ve tıbbi atıkların taşıma, toplama ve bertaraf işlerini yapan özel bir firma yetkilileriyle görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Tüm kaynaklardan elde edilen veriler doğrultusunda, Eskişehir'in tıbbi atık yönetimine yönelik faydalı bir araştırma yürütülmeye çalışılmıştır.

Tez, üç ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde konunun girişi yapılmış, sürdürülebilir lojistik ile ilgili bilgiler verilmiş ve literatür incelenmiştir. İkinci bölümde, problem tanımlanmış, metodoloji üzerinde durularak Eskişehir için bir tıbbi atık tersine lojistik modeli oluşturulmuştur. Ayrıca senaryolar açıklanmıştır. Son olarak, üçüncü bölümde sonuçlar değerlendirilerek öneriler sunulmuştur.

1.1. Sürdürülebilirlik

Günümüz dünyasında küresel ısınma, enerji kaynaklarının tükenmesi, doğal kaynakların sürdürülemez kullanımı, sera gazı etkisi ve karbon salınımı gibi çevresel sorunlar, işletmeler için önemli zorluklar oluşturmaktadır. Bu ekolojik baskıların yanı sıra, küresel ekonomik belirsizlikler ve yoğun rekabet de işletmelerin faaliyetlerini etkilemektedir. Aynı zamanda, Öçal (2021)'e göre toplumsal beklentilerin ve sosyal sorumluluk taleplerinin artışı, işletmelerin sürdürülebilirlik ilkelerini benimsemelerini gerektirmektedir. Ayrıca yasal zorunluluklar da sürdürülebilirliği desteklemektedir. Bu nedenle, birçok sektörde olduğu gibi lojistik sektöründe de sürdürülebilirlik, giderek daha fazla önemsenen bir mesele haline gelmiştir. Bu bağlamda, sürdürülebilirlik ilkelerinin lojistik sektöründe uygulanması, çevresel etkilerin azaltılmasının yanı sıra toplumsal ve ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Şekil 1.1'de sürdürülebilirliğin bileşenlerini görmek mümkündür.



Şekil 1.1 Sürdürülebilirliğin bileşenleri (Mücevher M. H. (2021))

Vivien (2008)'e göre ekonomik sürdürülebilirlik, üretim ve tüketim arasındaki ilişkinin dinamiklerini içeren ve ekonominin sürekliliği için kritik öneme sahip olan bir kavramdır. Bu kavram, insanların mevcut ve gelecekteki verimliliği artırarak istek ve ihtiyaçlarını karşılama amacını taşır ve böylece sürdürülebilir kalkınmanın sağlanmasına katkıda bulunur.

Morelli (2011) çevresel sürdürülebilirlik, doğadaki kaynakların sınırlı olduğunu ve bu kaynakların bilinçli bir şekilde tüketilmesi gerektiğini vurgular. Bu kavram, tüm yaşam formlarının çevresel sürdürülebilirlik konusunda büyük bir sorumluluğa sahip olduğunu ve doğal kaynakların korunması gerekliliğini ortaya koyar. Çevresel sürdürülebilirlik, doğal kaynakların korunması, atık ve kirliliğin azaltılması, geri dönüşümün teşvik edilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması gibi önlemleri içerir, bunların yanı sıra uygun yasal düzenlemeler ve koşullar altında çevrenin korunması gerektiğini ifade eder.

Mak ve Peacock (2011)'e göre sosyal sürdürülebilirlik, yaşam standardı, eğitim, sağlık, refah, güvenli yaşam gibi faktörleri içerir. Bu kavram, bireylerin ve toplumların hem bireysel hem de grup olarak hedeflerine ulaşmasını sağlayan iletişim ve ilişkileri kapsar.

1.1.1. Sürdürülebilir Lojistik

Sürdürülebilir lojistik, ekonomik, çevresel ve sosyal faktörleri göz önünde bulundurarak lojistik faaliyetlerin planlanması, uygulanması ve yönetilmesini içeren bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, işletmelerin maliyetlerini optimize ederek ekonomik verimliliği artırırken, doğal kaynakların etkin kullanımını teşvik eder ve atık/emisyon miktarını azaltarak çevresel etkiyi en azlar. Ayrıca, işgücüne ilişkin sosyal sorumlulukları da göz önünde bulundurarak, işletmelerin toplumsal refahı artırmasına yardımcı olur. Bu şekilde, sürdürülebilir lojistik, ekonomik başarı, çevresel koruma ve toplumsal refah arasında bir denge sağlar, uzun vadeli sürdürülebilirlik için önemli bir katkı sağlar.

Erol ve Özmen (2008)'e göre karbon salımının azaltılması ve yakıt tüketiminin minimize edilmesi için uygun taşıma araçlarının seçimi, periyodik bakım ve onarımların düzenli olarak yapılması, taşıma mesafelerinin kısaltılması ve depo veya

fabrika etrafında meydana gelen trafik akışının azaltılması gibi önlemler, sürdürülebilir lojistik uygulamaları arasında yer almaktadır.

Çamlıca ve Akar (2014)'e göre sürdürülebilir lojistik kapsamında depolama süreçlerinde de çeşitli önlemler alınabilir. Örneğin, stok seviyelerinin düşürülmesi, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayabilir.

Dey vd. (2011)'e göre stokların uygun seviyelerde tutulması, özellikle küçük ölçekli işletmelerde tamamlanmış ürün stoklarını düşürerek, hammadde, soğutma ve ısınma maliyetlerinde azalmayı sağlayabilir.

Bu önlemlerin yanı sıra, sürdürülebilir lojistik için üç ana strateji bulunmaktadır. Bu stratejiler, yeşil lojistik, yalın lojistik ve tersine lojistik kavramlarını içermektedir.

1.1.1.1 Sürdürülebilir Lojistik İçin Üç Ana Strateji

Yeşil Lojistik

Mücevher (2021)'e göre sürdürülebilir lojistik alanındaki en yeni stratejilerden biri yeşil lojistik olarak bilinmektedir. Yeşil lojistik ilk olarak çevresel endişelerin ve sürdürülebilirlik odaklı işletme uygulamalarının önem kazandığı 1990'lı ve 2000'li yıllarda ortaya çıkmıştır. Yangınlar ve Bal (2019)'a göre yeşil lojistik kavramı, lojistik faaliyetlerin çevresel etkilerini en aza indirmeyi, kaynakları verimli kullanmayı ve sürdürülebilirlik ilkelerini lojistik operasyonlarına entegre etmeyi amaçlar. Yeşil lojistik uygulamaları, çeşitli dağıtım stratejilerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesini, lojistik operasyonlarda enerji kullanımının azaltılmasını, atık miktarının ve atıkların yönetimini içerir. Abduaziz vd., (2015)'ne göre yeşil lojistik yönetimi, ürünlerin tedarik zinciri sürecinde tüketici gereksinimlerini karşılamak için tasarlanması ve sunulması esnasında geri dönüştürülebilir kaynakların etkin kullanımını amaçlayarak depolama, stoklama, paketleme ve taşıma gibi süreçleri optimize etmeyi hedefler. Çevre yönetimi, yeşil tedarik zinciri, iş birliği ve ekonomik tasarım gibi unsurlar, yeşil lojistik uygulamalarının alt bileşenleri arasında bulunmaktadır (Wang vd., 2013). Geleneksel lojistik ile yeşil lojistik arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Yurtkuran (2021)'a göre geleneksel lojistikte ekonomik büyümeyle birlikte çevresel etkiler artarken, yeşil lojistikte çevresel etkiler azalırken ekonomik ve sosyal gelişme sağlanır ve çevresel sürdürülebilirlik artar.

Tablo 1.1'de, geleneksel lojistik ile yeşil lojistik arasındaki ana farklar belirtilmektedir.

Tablo 1.1 Geleneksel lojistik (ileriye doğru lojistik) ve yeşil lojistik arasındaki temel farklar (Xiu vd., (2012))

	Geleneksel Lojistik (İleriye Doğru Lojistik)	Yeşil Lojistik
Esas Amacı	Çevresel bozulmayı göz ardı ederek ekonomik anlamda yüksek lojistik verimliliği elde etmek.	Sürdürülebilir kalkınmaya ve temel olarak lojistiğin teknolojik ilerlemesine ve yeniliğine ulaşmak. Bununla birlikte lojistik sürecin çevreye olan etkisini kademeli olarak ortadan kaldırmak.
Aktörler	Aktörler sadece lojistik işiyle uğraşan kişilerdir.	Aktörler sadece lojistik girişimin kendisini değil, aynı zamanda tedarik zincirinin akışındaki imalat ve perakende işletmelerini de içerir. Bu nedenle, aktörler etkin bir sinerji elde edebilir, mevcut kaynakları entegre kullanabilir, kaynak israfını azaltabilir ve kaynak kullanımını iyileştirebilir.
Lojistik Sistem	Sadece kaynak çıkarımından ürüne ve tüketmeye kadar lojistiği dikkate alır ve atık malzemelerin oluşturduğu yenilenebilir kaynakların geri dönüşümünü ihmal eder.	Dairesel özelliklere sahiptir. İleri lojistiğin yeşil yönlerini göz önünde bulundurabilir, aynı zamanda kaynak israfının, atık malzemelerin geri dönüşümü, kaynak atığının toplanması vb. işleri dikkate alır.

Son yıllarda, insan faaliyetlerinin ve lojistik aktivitelerin dünya çapındaki çevresel etkilerine yönelik farkındalık artmıştır. Bu etkilerin uzun vadeli sürdürülebilir olmadığı kabul edilmiş ve birçok organizasyon ve işletme, karbon ayak izlerini ölçerek çevresel etkilerini değerlendirmiştir. Emisyonların ve diğer çevresel ölçütlerin azaltılması, hükümetlerin politikalarında önemli bir yer tutmaktadır. Bu bağlamda, şirketlerin ve hükümetlerin yeşil lojistiğe olan ilgisi artmıştır. Yılmaz ve Keser (2018)'e göre dünya genelinde gerçekleşen pek çok faaliyet, sera gazı emisyonlarına neden olurken, bu emisyonların yaklaşık %24'ü lojistik faaliyetlerle ilişkilendirilmektedir. Ayrıca, lojistik operasyonlarından kaynaklanan emisyonların en büyük katkısının, karayolu taşımacılığından geldiği bilinmektedir. Bu durum, yeşil lojistiğin önemini belirtmektedir.

Yeşil lojistik uygulamalarını benimseyen şirketlerin, çevresel konularda belgelendirme ve sertifikasyon süreçlerine katılarak bu uygulamalarını güçlendirmesi,

günümüzde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özkök ve Yardımcı (2016) ISO 14025 (çevresel ürünlerin beyan edilmesi ile ilgili), ISO 14040-44 (ürünlerin yaşam döngüsü değerlendirmesi ile ilgili), ISO 14064 (sera gazı emisyonu ölçümü ve denetimine dair standartlar ile ilgili) ve ISO 14067 (karbon ayak izi standardı ile ilgili) işletmelerin yeşil lojistik ile ilgili uygulayabileceği standartlar ve alabileceği belgeler arasında olduğunu belirtmiştir.

Avrupa Konseyi (2019), 11 Aralık 2019 tarihinde açıkladığı Avrupa Yeşil Mutabakatı ile endüstriyel faaliyetlerin köklü ve çevreci bir dönüşüm gerektirdiğini vurgulamıştır. Avrupa Konseyi, 2030-2050 hedeflerinin çeşitli sektörlerle etkilerini ele alan bir rapor sunmuştur. Bu rapor, taşımacılık ve lojistik sektörlerinin sera gazı emisyonlarındaki önemli rolüne dikkat çekmektedir. Farklı taşıma yöntemlerinin kombinasyonu, yakıt bileşimindeki değişiklikler, sürdürülebilir taşımacılık modlarının daha yaygın kullanımı, dijitalleşme ve teşvik mekanizmaları gibi araçlarla karbon emisyonlarında hedeflenen azaltıma ulaşılması hedeflenmektedir.

Lojistik firmalarının yeşil olmasının avantajlarını aşağıdaki gibi sıralanabilir. (Eşmen vd. ,2015)

- Hizmet üretim sistemlerine ve operasyon prosedürlerine özgünlük katarak çevresel etkileri yönetmek ve yasal düzenlemelere uyum sağlamak için öğrenme fırsatları sunar.
- Ürün ve hizmetlerin tedarik kalitesini ve verimliliğini artırır.
- Yeşil ekonominin gereksinimleri, yenilikçi kararlar almayı teşvik eder ve operasyon maliyetlerini düşürücü etkilere sahiptir.
- Çevresel ihtiyaçlara uygun ürünler geliştirme, hizmet ve ürünlerde farklılık yaratır.
- Yeşil yaklaşım, özellikle satış anlamında işletmeye güç kazandırır ve sürdürülebilirlik ve sosyal sorumluluk alanlarında tüketici farkındalığını artırır.

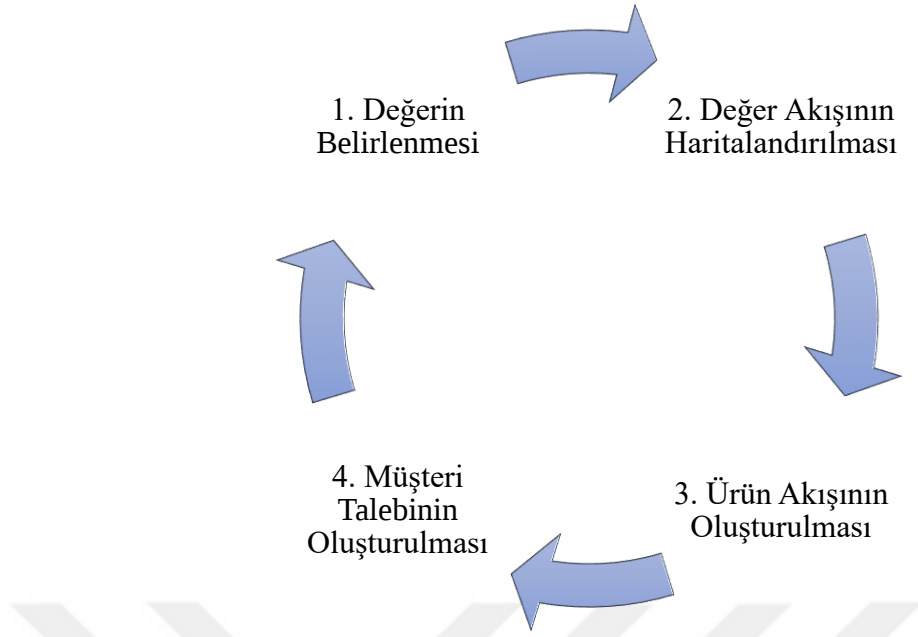
Bardakçı (2022)'ye göre yeşil lojistik düzenlemeleri başlangıçta yüksek maliyetler gerektirebilir ve kısa vadede maliyetli olabilir; ancak uzun vadede, vazgeçilmez unsurları haline gelmektedir. Yeşil lojistik, ekonomik, sosyal ve çevresel açılardan birçok fayda sağlar. Bu faydalar sadece maddi katkılarla sınırlı kalmaz, aynı zamanda geleceğe dair endişelerin azalmasına da yardımcı olur. Ekonomik hedefler, maliyetleri

en aza indirerek yüksek kar elde etmeyi amaçlarken, sosyal hedefler tüketicilerin memnuniyetini artırmayı ve kuruluşların sosyal sorumluluklarını geliştirmeyi hedefler. Çevresel hedefler ise çevresel etkileri minimuma indirerek, karbon salınımını azaltarak, enerji tüketimini düşürerek ve atık yönetimini iyileştirerek çevresel sürdürülebilirliği destekler.

Yalın Lojistik

Sürdürülebilir lojistik stratejileri arasında yer alan bir diğer yaklaşım da yalın lojistikdir. Bruun ve Mefford(2004). 1990'lı yıllardan bu yana, birçok imalat firması, rekabet gücünü artırmak için yalın üretim stratejilerine başvurduğunu belirtmiştir. Pavnaskar vd.(2003) yalın üretim stratejisi, Taiichi Ohno ve Shigeo Shingo tarafından geliştirilen TPS (Toyota Üretim Sistemi) kökenli olduğunu ifade etmiştir. Yalın lojistik, lojistik operasyonlarında atıkların azaltıldığı, maliyetlerin minimize edildiği, stokların optimize edildiği, işlemlerin hatasız ve tek bir adımda gerçekleştirildiği ve sürekli iyileşme ve gelişme odaklı bir yaklaşımı temsil eder.

Yalın lojistik iyileştirmeleri için 5S yöntemi, işyerlerinde verimliliği artırmak ve israfı önlemek amacıyla kullanılan bir araçtır. Gapp vd. (2008 5S'in Japonca kısaltmaları olan "Seiri" (sıralama), "Seiton" (düzenleme), "Seiso" (temizlik), "Seiketsu" (standardizasyon) ve "Shitsuke" (disiplin) adımlarından oluştuğunu belirtmiştir. Her adım, işyerindeki israfları azaltarak, iş akışını iyileştirerek ve çalışanların performansını optimize ederek operasyonel süreçleri iyileştirir. Örneğin, Seiri adımı gereksiz öğelerin belirlenmesini ve kaldırılmasını içerirken, Seiton sık kullanılan öğelerin düzenli bir şekilde yerleştirilmesini sağlar. Seiso, işyerinin temiz ve düzenli tutulmasını hedeflerken, Seiketsu standartların uygulanmasını sağlar. Son olarak, Shitsuke işyerindeki düzenin ve standartların sürekliliğini sağlamak için çalışanlarda disiplini teşvik eder. Bu adımların uygulanmasıyla, işyerlerinde etkinlik artar, israf azalır ve operasyonel süreçler daha verimli hale gelir. Bu süreç, kurumların müşterileri adına israf ve verimsizlik nedeniyle ek maliyetler ödemelerini önler. Lojistik Bilimi (2021)'e göre israfı azaltmak için dört ilke bulunmaktadır. Şekil 1.2'te bu ilkelere yer verilmiştir.



Şekil 1.2: İsrafi azaltmak için dört ilke

Bu dört ilkenin açıklaması aşağıdaki gibidir:

- 1) Değerin Belirlenmesi:** Bu aşamada müşterinin değeri belirlenir ve tüm tedarik zinciri ağına entegre edilir.
- 2) Değer Akışının Haritalanması:** Bu aşamada tedarik zinciri ağı boyunca süreçlerin değeri ölçülür ve ürüne değer katmayan süreçler tanımlanır. Değer yaratma ve belirleme, müşteri odaklıdır.
- 3) Ürün Akışının Oluşturulması:** Bu aşamada değerli süreçler sisteme entegre edilir. Bu süreçlerin temel faktörleri, kesinti süresinin azaltılması, kesintilerin minimize edilmesi ve envanterin azaltılmasıdır.
- 4) Müşteri Talebinin Oluşturulması:** Ürünlerin imalatında müşteri talepleri göz önünde bulundurulur. Talep bilgileri işlenir ve tedarik zincirinin her aşamasında kullanılır.

Yangınlar ve Bal (2019)'a göre yalın lojistiğin temeli, lojistik süreçlerin etkin, verimli ve koordineli bir şekilde planlanması, organize edilmesi, uygulanması ve denetlenmesidir. Ayrıca, Jordan (2002)'a göre istenilen hizmet kalitesini sağlamak için hammadde ve stokların, depolama ve taşıma süreçlerinde kontrol altında tutulması gerekmektedir. Rahman vd. (2010), yalın lojistik uygulamalarının ürün ve hizmet kalitesini artırdığını ve müşteri memnuniyetine katkı sağladığını ifade etmektedir.

Geleneksel lojistik ile yalın lojistik arasında belirgin farklar mevcuttur. Özkan vd., (2015)'ne göre iş birliği, koordinasyon, çift taraflı tedarik ağları, geleceğe dönük planlama, azalan maliyetler ve israf, stokların minimize edilmesi ve daha esnek üretim gibi özellikler, lojistik yönetimine yalınlık getirir ve bu konularda geleneksel lojistikten farklılık gösterir. Akben ve Güngör (2018) çalışmalarında, geleneksel lojistik yönetimi ile yalın lojistik yönetimi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir ve yalın lojistik yönetiminin işletme performansını etkilediği sonucuna ulaşmışlardır. Goldsby ve Garcia-Dastugue (2008) çalışmasında, müşteri ve tedarikçi arasında karşılıklı uyum ve sadelik ilkelerine vurgu yapılmıştır. Srinivasan (2011) çalışmasında ise, tedarik zincirinde yer alan tüm işletmelerin entegre olduğu ve ürünlerin en kısa sürede, en düşük maliyetle hatasız bir şekilde tüketicilere ulaştırılması vurgulanmıştır. Afonso ve Cabrita (2015)'ya göre yalın üretim uygulamanın faydaları yöneticileri, tedarikçileri, distribütörleri, üreticileri, müşterileri ve diğer paydaşları yalın düşünce içinde kapsayan tüm tedarik zincirine yalın felsefeleri genişletme konusunda motive etmiştir. Tablo 1.2'de, geleneksel lojistik ile yalın lojistik arasındaki farklar belirtilmektedir.

Tablo 1.2: Geleneksel lojistik ve yalın lojistik arasındaki farklar. (Özkan vd., (2015)

Lojistik Değişkenleri	Geleneksel Lojistik	Yalın Lojistik
Yönetim	Pazar odaklı	Kendi kendini yöneten
Yapı	Dikey	Kümelenmiş
İletişim	Kısıtlı	Geniş
Bilgi Transferi	Tek taraflı	Çift taraflı
Teknoloji Kullanımı	Çok kısıtlı	Geniş
Etkileşimler	Rekabete dayalı	İşbirliğine dayalı
İlişki Odağı	İşlem odaklı	Karşılıklı kazan kazan
Teslim-Dağıtım	Büyük miktarlar	Küçük miktarlar
Depolama	Maksimum seviyede	Minimum seviyede
Üretim Esnekliği	Düşük	Yüksek
Kalite	Deneyim/yoğun	Tasarlanan
Fiyat Uygulamaları	Rekabete dayalı	Hedef maliyete dayalı
Fiyat Değişimleri	Artan	Azalan
Dış Kaynaklardan Yararlanma	Maliyete dayalı	Stratejik
Seçim Ölçütleri	Minimum fiyat	Performans
Sözleşme Süresi	Kısa	Uzun

Tersine Lojistik

Ersoy (2006)'ya göre lojistik uygulamalarında sürdürülebilirlik için, tersine hareketler de göz önünde bulundurulmalıdır. Öz (2011)'e göre lojistik faaliyetlerinin sadece ürün ve hizmetlerin üretim yerinden tüketim yerine ulaştırılması olarak görülmesi yetersizdir. Çünkü ürünlerin yaşam döngüsü, tüketicilere ulaştırıldıktan sonra da devam etmektedir. Tersine lojistik, 1980'lerden itibaren incelenmeye başlanmış ancak 2000'li yıllarla birlikte araştırmaları daha fazla yoğunlaşan bir alan olmuştur. 1980'lerde tersine lojistiğin ortaya çıkmasına, çevresel kaygıların ve atık yönetimi konusundaki farkındalığın artması vesile olmuştur. Bu dönemde, çevre kirliliği ve atık miktarındaki artışın çeşitli endüstrilerde ciddi bir sorun haline gelmesi, işletmeleri ürünlerin yaşam döngüsünün tamamını ele almak ve atıkları yönetmek konusunda daha duyarlı olmaya yönlendirmiştir. Bu bağlamda, ürünlerin geri dönüşümü, yeniden kullanımı ve atık yönetimi gibi tersine lojistik uygulamaları, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için önemli bir rol oynamıştır.

Tersine lojistik, literatürde çeşitli tanımlarla ele alınmıştır. Bu kavramın ilk tanımları Lambert ve Stock (1981) tarafından yapılmıştır. (Rogers ve Tibben-Lembke, 2001). Tersine lojistik, ileri lojistiğin önemine vurgu yaparak "tek yönlü bir yolda yanlış yönde gitmek" olarak açıklanmıştır. Önceki araştırmalarda (Zikmund ve Stanton, 1971; Gultinan ve Nwokoye, 1975; Ginter ve Starling, 1978), geri dönüşüm süreçleri için 'dağıtım kanalları, geri dönüşüm faaliyetlerinde tersine dağıtım' gibi terimler kullanılmıştır. 1980'lerde, tersine lojistik terimi, birincil akışın tersine doğru, yani müşteriden üreticiye ürün hareketiyle sınırlı olarak algılanmıştır. (Rogers ve Tibben-Lembke, 2001). Stock (2001) tarafından yapılan tanıma göre, tersine lojistik ürün iadeleri, kaynak azaltımı, geri dönüşüm, malzeme değiştirme, malzemelerin yeniden kullanımı, atık bertarafı ve yakılması, tamir ve yeniden üretimde lojistiğin rolünü içermektedir. Rogers ve Tibben-Lembke (1998) tersine lojistiği, üretici, dağıtıcı veya kullanım noktasından belirli bir üretim tesisine malzeme akışının planlanması, uygulanması ve kontrolü olarak tanımlar; bu süreç, ürünlerin son kullanım yerlerinden değer kazanımı veya çevreye en az zararla bertarafını içermektedir. Büyükkeklik ve Ergülen (2016) tersine lojistiği, ürünlerin değer kazanımı için toplanması ve uygun geri dönüşüm tesislerine gönderilmesi, lojistik bakış açısından bir akış oluşturur ve ulaştırma, depolama, stok yönetimi ve geri dönüşüm faaliyetlerini içeren geniş bir süreç olarak ifade etmektedir.

Bu faaliyetleri Güzel ve Asar (2017) aşağıdaki şekilde açıklamıştır:

- **Doğrudan Yeniden Kullanma:** İşletmeye iade edilen ürünün hasarsız veya kullanılmamış durumda olması halinde, ürünün basit bir bakım sonrasında yeniden kullanılmasıdır.
- **Onarım:** İşletmeye iade edilen ürünün hasar görmesi durumunda onarılması ve müşteriye yeniden sunulması işlemidir.
- **Ürün Revizyonu:** Hasar görmüş veya modası geçmiş ürünlerin, parçalarının değiştirilerek restore edilmesidir.
- **Ürünün Tekrar İmal Edilmesi:** Ürün, kullanılabilir parçaların tekrar bir araya getirilmesiyle yeniden üretilir.
- **Ürünün Kısmen Kullanılması:** Ürünün yeniden kullanılabilir durumdaki sınırlı sayıdaki bileşenlerinin kullanıldığı ve diğer parçaların başka ürünlerden sökülerek montajının yapıldığı bir işlemdir.
- **Geri Dönüşüm:** Ürün parçalarının doğrudan veya başka yöntemlerle kullanılamaz hale geldiği durumlarda, bu parçaların geri dönüşüm tesislerine gönderilerek hammadde haline getirilmesini sağlayan bir süreçtir.
- **Yakma ve Gömme:** Geri dönüşümü veya tekrar kullanımı mümkün olmayan ürünlerin imha edildiği bir işlemdir. Tersine lojistiğin bileşenleri, bu tanımlamalardan esinlenerek Tablo 1.3'te özetlenmiştir.

Tablo 1.3: Tersine lojistik bileşenleri (Lourenço ve Soto (2002))

Girdiler	Atıklar, kullanılmış ürünler, önceden gönderilmiş ürünler veya parçalar, tehlikeli veya tehlikeli olmayan atıklar ve ambalajlar, bilgi, hammadde, süreç içi olan stoklar, son çıkan ürünler ve ürün içeriği gibi
Etkinlikler	Maliyet etkin bir akışın sağlanması ve etkin akışın planlanması, uygulanması ve kontrolü, toplanması, taşınma, depolanma, işlenmesi, kabulü, yenilenmesi, paketlenmesi, gönderilmesi, azaltılması, yönlendirilmesi ve imhası
Çıktılar	Tekrar kullanılabilir ürünler, geri dönüşüm, tekrar üretim, imha, azaltma, yönlendirme, geri kabul değeri
Yönü	Tüketim noktasından üreticiye, toplama tesisine veya ürünün kaynağına

- **Yenileme:** Geri dönen ürünlerin onarılması veya yeniden işlenmesi aşamasıdır. Firma, bu ürünleri yeniden üretebilir, onarabilir veya yeniden kullanabilir.
- **Taşıma:** Ürünlerin organizasyonun tedarik zincirindeki hareketi sürecidir.
- **Yeniden Düzenleme:** Yönetimin, dönüşüm sürecinin daha verimli hale gelmesi için tersine tedarik zincirini gözden geçirme ve iyileştirme aşamasıdır.

Şekil 1.4'te son aşamada gerçekleştirilen yakma ve gömme, ürünlerin düzgün bir şekilde imha edilmesini temsil eder. Özellikle tehlikeli atıkların doğaya zarar vermeden, kontrollü bir şekilde imha edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu uygulama, hava, toprak ve su kirliliğini minimum seviyeye indirerek çevrenin korunmasına katkı sağlar. Carter ve Ellram (1998) tarafından ifade edildiği üzere, tersine lojistik hiyerarşisi, Şekil 1.4'teki gibi olmalıdır.



Şekil 1.4: Tersine lojistik hiyerarşisi (Carter ve Ellram (1998))

Şekil 1.4'te görüldüğü üzere, temel hedef, üretim sürecinde kullanılan kaynakların (malzeme, enerji, vb.) daha az tüketilmesi, yani kaynak azaltımıdır. Hiyerarşinin alt basamağında yer alan yeniden kullanım, daha önceki üretim aşamalarında değer kazanmış parçaların (hammadde, işçilik, üretim aktiviteleri) tekrar değerlendirilmesini ifade ederken, geri dönüşüm ise materyallerin yeniden değerlendirilmesi sürecini temsil eder. Nakıboğlu (2007)'na göre eğer ürün, bileşen veya malzeme bu süreçler

için uygun değilse veya imha edilmesi gerekiyorsa, enerji tasarrufu sağlayacak şekilde imha edilmesi (yakılması) tercih edilmelidir.

Tersine lojistiğin sunduğu faydaları aşağıdaki gibi 5 maddede özetleyebiliriz:

- **Çevresel ve Sosyal Sorumluluk:** Tersine lojistik, doğal kaynakların daha etkin kullanılmasını teşvik ederek çevresel sürdürülebilirliği artırırken, işletmelerin sosyal sorumluluklarını yerine getirmesine olanak tanır. Bu uygulamalar, işletmelerin topluma karşı duyarlılığını artırır ve rekabet avantajı sağlar.
- **Yasal Uyum ve İtibar:** Tersine lojistik uygulamaları, işletmelerin çevresel düzenlemelere uyum sağlamasına yardımcı olurken, şirketin itibarını korumasına ve rekabet gücünü artırmasına olanak tanır. Bu sayede işletmeler, yasal sorumluluklarını yerine getirirken müşteri memnuniyetini de artırabilir.
- **İşletme Verimliliği ve Maliyet Azaltma:** Geri dönüşüm faaliyetleri ve enerji tasarrufu önlemleri, işletmelerin iç verimliliğini artırırken maliyetleri düşürür. Bu uygulamalar, işletmelerin rekabetçi kalmasını sağlar ve uzun vadeli karlılığı artırır.
- **Müşteri İlişkileri ve Pazarlama:** Çevre dostu uygulamalar, müşteri sadakatini artırır ve işletmelerin müşteri ilişkilerini güçlendirir. Tersine lojistik sayesinde işletmeler, çevreci bir imaj oluşturarak müşterilerin güvenini kazanır ve pazarda daha rekabetçi konuma gelir.
- **Gelecek Nesillere Yatırım:** Tersine lojistik uygulamaları, gelecek nesillere sürdürülebilir bir dünya bırakma hedefini destekler. Bu uygulamalar, işletmelerin uzun vadeli başarı ve sürdürülebilir büyüme için önemli bir temel oluşturur.

Coşkun, (2011)'a göre tersine lojistik, lojistik uygulamalarını çevresel sürdürülebilirlik ilkeleriyle bütünleştirerek geleneksel lojistikten ayrılmaktadır. Ayrıca, tersine lojistik, malzeme döngüsünü tamamlayarak ve geri dönüşüm süreçlerini entegre ederek, yenilikçi bir yaklaşım sunar. Tersine lojistik ve geleneksel lojistik arasındaki farklar Tablo 1.4'te görülmektedir.

Tablo 1.4: Tersine ve geleneksel lojistiğin karşılaştırılması (Min ve Ko (2008))

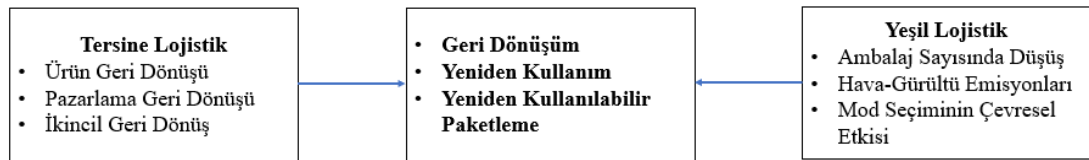
Lojistik Değişkenleri	Geleneksel Lojistik (İleriye Doğru Lojistik)	Tersine Lojistik (Geriye Doğru Lojistik)
Miktar	Standart ürünlerden büyük miktarlarda	Küçük miktarlar
Bilgi İzleme	Otomatik sistemler	Otomatik ve el kontrollü sistemler
Sipariş Çevrim Süresi	Kısa vadeli	Orta ve uzun vadeli
Ürün Değeri	Yüksek ürün değeri	Makul ölçüde ürün değerini düşürme
Envanter Sayımı	Odaklanır	Odaklanmaz
Öncelik	Yüksek	Düşük
Maliyet	Daha açık	Daha belirsiz
Ürün Seyri	İtme şeklinde tek yönlü	İtme ve çekme şeklinde çift yönlü
Dağıtım Kanalları	Tek ya da birkaç kademeli, daha az karmaşık	Çok kademeli, daha karmaşık ve daha farklı

Kılıç ve Yaprak (2022), 2016-2022 yılları arasında Türkiye’de yapılan tersine lojistik çalışmalarının bibliyometrik analizini yapmışlardır. İmalat/üretim sanayilerinde çalışmaların fazla olduğunu, aynı zamanda iletişim ve perakende gibi hizmet sektörlerinde de araştırmaların yapıldığını ifade etmişlerdir. Bu araştırma, çalışılan sektörlerin sayılarına odaklanmak yerine hangi sektörlerde çalışıldığına odaklanmıştır. Kılıç ve Yaprak (2022)’ye göre bu yaklaşım, tersine lojistik alanında çalışmak isteyen araştırmacılara rehberlik etme amacını taşımaktadır. Yapılan bu çalışmanın sonucu Tablo 1.5’te verilmiştir.

Tablo 1.5: Tersine lojistik konulu araştırma makalelerinin odaklandığı sektör ve alan dağılımı

Sektör / Alan		
Demir-Çelik Sektörü	İletişim Sektörü	Otomotiv Sektörü
Kamusal Alanlar	Sağlık Sektörü	Perakende Sektörü
Organize Sanayi Bölgeleri	Tüketici Davranışı	Tekstil Sektörü
Kağıt Üretimi	İhracat Yapan İşletmeler	Alüminyum Sektörü
Gıda Sektörü	Elektronik Sektörü	Pil Üretimi
Kauçuk Üretimi	Plastik Sektörü	İmalat Sanayi

Çetin ve Sain (2018), tersine lojistiğin, atıkların ve kullanılan malzemelerin üretim sürecine yeniden katılmasını hedefleyerek yeşil lojistiğin bir türevi olduğunu ifade etmektedir. Lai ve Wong (2012), yeşil lojistik alanındaki faaliyetlerin yeşil tedarik, yeşil dağıtım, yeşil paketleme ve tersine lojistik adımlarını içerdiğini belirtmişlerdir. Yeşil lojistik, doğal kaynakların korunması ve atık miktarının azaltılması amacıyla çevresel sürdürülebilirlik ilkelerini lojistik süreçlerine entegre etmeyi hedefler. Tersine lojistik ise, kullanılmış ürünlerin geri dönüşümü ve yeniden kullanımını içeren faaliyetlerle bu amaca katkı sağlar. Dolayısıyla, yeşil lojistik, tersine lojistiği içermektedir. Her ikisi de çevresel etkileri azaltarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunur; ancak aralarında bazı farklılıklar mevcuttur. Yeşil lojistik ile tersine lojistik arasındaki bağlantı ve ayrımlar, Şekil 1.5’te gösterilmektedir.



Şekil 1.5: Yeşil lojistik ile tersine lojistik karşılaştırılması (Seroka (2014))

Şekil 1.5’te belirtilenler doğrultusunda, tersine lojistik ve yeşil lojistik, geri dönüşüm, yeniden kullanım ve yeniden kullanılabilir paketleme süreçlerinde ortak bir noktada kesişir. Her ikisi de ürünlerin geri dönüşümüne ve yeniden kullanılabilir hale getirilmesine odaklanır. Tersine lojistik, ekonomik etkenleri düşünerek faaliyet gösterirken, yeşil lojistik çevresel endişeleri minimize ederek hem çevresel hem de ekonomik açıdan faydalı olmayı amaçlar.

Tersine lojistik, basit bir tanımla tüketicilerden kullanılmış ürünlerin toplanması, depolanması, yeniden işlenmesi ve geri dağıtılmasını içeren bir süreçtir. Tersine lojistik süreçlerinin tasarlanması, ileri lojistik süreçlerinin tasarımından daha kompleks bir sürece sahiptir. Fleischmann (1997)’a göre tersine lojistik faaliyetlerini işletmelerin uygulayabilmesi için, mevcut sistemlerini, süreçlerini ve karar alma aşamalarını gözden geçirip yeniden düzenlemeleri gerekmektedir. Brito vd., (2005)’ne göre hangi ürünlerin toplanacağı önceden belirlenmelidir, ürün paketleri genellikle karmaşıklık içerir, gönderici ile iş birliği yapılması gereklidir ve toplanacak ürünler genellikle az değere sahiptir. Bu bağlamda, katman sayısına karar verilmesi, depoların

ve ara geçiş noktalarının adeti ve konumu, toplama işleminin için kullanılacak noktaların adeti, ileri ve geri akışın lojistik açıdan birleştirilmesi ve finansman konuları dikkate alınmalıdır. Lourenço ve Soto (2002)'ya göre tersine lojistikte, tedarik zinciri ileri lojistikteki tüm paydaşlara ek olarak, ikincil pazarlar olarak adlandırılan ve talep noktası olarak işlev gören üçüncü taraflar, atık depolama alanları, dernekler ve kurumlar gibi birçok unsuru içerir. 'Ürün ne zaman geri dönecek', 'ürün nereye gönderilmeli', 'firmanın karını maksimize etmek için hangi strateji seçilmeli' gibi sorular, tersine lojistik süreçlerinin tasarlanması için yanıtlanması gereken sorulardır.

Gaurang (2006), gelişmiş ve etkili bir tersine lojistik sisteminin gereksinimleri aşağıda belirtilmiştir:

- Özel toplama tesisi: Ürün çeşitliliğinden dolayı verimli bir toplama tesisi gereklidir.
- Sınıflandırma sistemi: Ürün çeşitliliğinin yönetilebilmesi için iyi tanımlanmış bir sınıflandırma sistemi gerekir.
- Stok politikası: Tersine lojistik akışının esnek bir şekilde ele alınabilmesi için uygun bir stok politikası belirlenmelidir.
- Zamanlama politikası: Geri alım süreçlerinin hızlı ve çevresel etkilerin minimize edilmesi için temel zamanlama politikası belirlenmelidir. Bu, ürün devir zamanının hesaplanmasını da içerir ve geri alınacak ürünlerin hızlı bir şekilde ele geçirilmesini sağlar.
- Enformasyon akışı: Yüksek verimli bir bilgi akışı sistemi, geri dönüşüm süreçleri ve izleme maliyetleri için gereklidir. Bu bilgi sistemi esnek, kapsamlı ve gerçek zamanlı olmalıdır ve ürünle ilgili çeşitli bilgileri içermelidir.
- Esneklik: Uygulamanın, nakliyenin ve diğer kapasite unsurlarının dahil edildiği esnek bir sistem planı gereklidir.
- Çok parçalı koordinasyon: Farklı katılımcıların koordinasyonu sağlanmalıdır.

Tersine lojistik ağının bu gereksinimlere uygun olarak özenle tasarlanması ve etkin bir şekilde yönetilmesi, işletmelerin rekabet avantajını güçlendiren sürdürülebilirlik, maliyet etkinliği ve yasal uyumluluk gibi faktörleri etkileyerek, atık azaltma, geri dönüşüm ve çevresel etkilerin en azlanması gibi hedeflere ulaşmada kritik bir rol oynar.

Tez çalışması sırasında yapılan araştırmalarda özellikle sağlık, otomotiv, elektronik, inşaat, gıda, tekstil ve ambalaj gibi endüstrilerde tersine lojistik ağ tasarımı konusuna odaklanıldığı görülmüştür. Bu sektörlerdeki farklı iş süreçleri ve atık yönetimi ihtiyaçları, tersine lojistik ağlarının stratejik olarak tasarlanmasını gerektirmektedir.

Tıbbi Atık Yönetiminde Tersine Lojistik Uygulamaları

Sağlık sektöründe tersine lojistik ağ tasarımı, hastaneler, klinikler ve diğer sağlık tesislerinden kaynaklanan tıbbi atıkların etkili bir şekilde toplanması, taşınması, depolanması, işlenmesi, geri dönüştürülmesi ve geri dönüştürülmesinin mümkün olmayacağı durumlarda imhası için stratejik bir planlama sürecidir. Bu çalışmalar genellikle atık miktarı ve türü, toplama ve taşıma yöntemleri, geri kazanım ve imha prosedürleri, yasal düzenlemelere uyum ve çevresel etkiler gibi faktörleri içerir. Ayrıca, salgın gibi beklenmedik durumların ele alınması, tasarlanan ağın esnekliği ve dayanıklılığı gibi konular da önemlidir. Shi (2009)'a göre tıbbi atık geri kazanım ağlarının etkili bir şekilde tasarlanması, tersine lojistik alanındaki öncelikli ve karmaşık konulardan biridir.

Qi vd., (2023)'ne göre tıbbi atıkların tersine lojistik ağının diğer atık yönetim ağlarından farklı birkaç özelliği bulunmaktadır. Bunlar arasında şunlar yer almaktadır:

- Üretilen tıbbi atık miktarı belirsizdir ve sosyal olaylar sonucunda artış ya da azalma olabilir.
- Tıbbi atıklar, oluştuktan sonra zamanında imha edilmelidir; aksi takdirde tıbbi atıkların uzun süreli bekletilmesi çevresel kirliliğe yol açabilir.
- Tıbbi atık üretimi, yoğun kaynak talebi gerektirir ve özellikle büyük salgınlar esnasında, salgın kaynaklı tıbbi atıklar genellikle belirli hastanelerde merkezi bir şekilde oluşur.

Tıbbi atık yönetimi, küresel nüfus artışı, savaşlar ve bulaşıcı hastalıklardaki artış gibi birçok zorluğun arasında öne çıkan bir konudur, çünkü bu faktörler tıbbi hizmetlere olan talebi artırmıştır. Aung vd., (2019) tarafından belirtildiği gibi, çevresel koruma, bulaşıcı hastalıklara karşı korunma, istenmeyen emisyonların azaltılması gibi çeşitli sorunlu konular dünya genelinde tıbbi atıkların yönetimi alanında ortaya çıkmıştır. WHO (Dünya Sağlık Örgütü), tıbbi atıkları "insan veya hayvan tedavisi, tanısı veya aşılama sırasında üretilen atıklar" olarak tanımlar. Mishra vd. (2020) çevresel ve halk sağlığı riskleri oluşturan tıbbi atıkların, çoğunlukla hastanelerden kaynaklanırken, bu

atıkların geri kalanı araştırma tesislerine, otopsi ve morg tesislerine, laboratuvarlara ve kan bankalarına dayandığını belirtmektedirler. Aydemir-Karadağ (2021) tüm tıbbi atıkların %75 ila %90'ının zararsız olduğu iddia ederken, geri kalan kısmın (%10 ila %25) tehlikeli olarak sınıflandırıldığı ifade etmektedir. WHO, 2018' ne göre kağıt, cam ve gıda artıkları gibi maddelerin bulunduğu yaklaşık %85 oranındaki kısmı genel atık olarak kabul edilirken, geriye kalan %15'lik kısım, kimyasallar, kesici ve delici objeler, ilaçlar ve yüksek konsantrasyonlarda ağır metaller, patojenler ve/veya genotoksik maddeler içeriyorsa tehlikeli atık olarak sınıflandırılır. Tıbbi atık içinde tehlikeli olmayan materyaller bulunan kısımlar, özel bir işleme tabi tutulmadan düzenli olarak bertaraf edilebilir. WHO (2017), tıbbi atıkların işlenmesi, farklı yöntemlerin tek başına veya bir arada kullanılmasıyla gerçekleştirilir; bu yöntemler termal işlemler, kimyasal işlemler, ısınlama teknolojileri, biyolojik ve mekanik işlemleri içerdiğini belirtir. Türkiye'de, 25/01/2017 tarih ve 29959 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanarak yürürlüğe giren tıbbi atık kontrolü yönetmeliği adı altında bir düzenleme bulunmaktadır. Bu düzenleme, belediyeleri tıbbi atık yönetimi konusunda yetkili makamlar olarak belirler ve sağlık kuruluşlarından atık taşınması, işleme tesislerinin kurulması ve atıkların il düzeyinde güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi gibi sorumlulukları belirler.

Türkiye Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (2005)'ne göre tıbbi atıklar bulaşıcı atıkları, patolojik atıkları ve kesici-delici atıkları içermektedir. Tıbbi atıkların yönetmeliğe göre ayrıntılı tanımlamaları aşağıdaki gibidir:

- **Bulaşıcı Atık:** Bulaşıcı etkenleri taşıdığı bilinen veya taşınması muhtemel; başta kan ve kan ürünleri olmak üzere her türlü vücut sıvısı, insan dokuları, organları, anatomik parçaları, otopsi materyali, plasenta, fetus ve diğer patolojik materyali, bu tür materyal ile bulaşmış eldiven, örtü, çarşaf, bandaj, flaster, tamponlar, eküvyon ve benzeri atıkları, karantina altındaki hastaların vücut çıkartılarını, bakteri ve virüs tutucu hava filtrelerini, enfeksiyon yapıcı ajanların laboratuvar kültürlerini ve kültür stoklarını, enfekte hayvanlara ve çıkartılarına temas etmiş her türlü malzemeyi, veterinerlik hizmetlerinden kaynaklanan atıkları içerir.
- **Patolojik Atık:** Cerrahi girişim, otopsi, anatomi veya patoloji çalışması sonucu ortaya çıkan dokuları, organları, vücut parçalarını, vücut sıvılarını ve fetusu içerir.

- **Kesici-Delici Atık:** Enjektör ve diğer tüm tıbbi girişim iğneleri, lanset, kapiller tüp, bisturi, bıçak, serum seti iğnesi, cerrahi suture iğneleri, biyopsi iğneleri, intraket, kırık cam, ampul, lam-lamel, kırılmış cam tüp ve petri kapları gibi batma, delme, sıyrık ve yaralanmalara neden olabilecek atıkları içerir.

Tüm tıbbi atıkların üretim noktasında ayrılması ve uygun şekilde işlenmesi ve güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi son derece önemlidir. Bu, tıbbi atıkların yanlış ayrılmasının, toplanmasının ve bertaraf edilmesinin hava, su ve toprak kalitesini bozabileceği ve aynı zamanda tehlikeli maddelerin ve bulaşıcı hastalıkların (AIDS, Hepatit-A ve B ve COVID-19 vb.) yayılmasına neden olabileceği gerçeği nedeniyledir. (WHO 2017). Tıbbi atık yönetmeliğine göre, tıbbi atıkların üretim kaynağında çevreye ve insan sağlığına zarar vermeden ayrı bir şekilde toplanmasını gerektirir. Tıbbi atıkların uygun bir şekilde ele alınmaması, sağlık personeli ve toplum için enfeksiyon ve yaralanma risklerini artırabilir.

Bulaşıcı atık yönetimi, salgınların kontrol altına alınmasında kritik bir öneme sahiptir. Özellikle COVID-19 salgını sonrasında sağlık kuruluşlarında üretilen tıbbi atıklarda belirgin bir artış yaşanmıştır. Salgın sürecinde, dünya genelinde tıbbi atıkların miktarı ve karmaşıklığı arttıkça, güvenli olmayan taşıma ve imha uygulamalarıyla hastalık bulaşma riski de artmıştır. Çin'deki hastanelerde, COVID-19 vakalarının en yoğun olduğu dönemlerde tıbbi atık üretiminin katlanarak arttığı da yadsınamaz bir gerçektir. (Mandy 2020; Sarkodie ve Owusu 2021), bu durumun, Çin'in günlük atık bertaraf kapasitesini artırmak için yeni tıbbi atık bertaraf tesisleri ve mobil atık tesisleri inşa etmek zorunda kalmasına neden olduğunu vurgulamışlardır. Benzer şekilde, dünya genelinde uygun tıbbi atık yönetimi için özel düzenlemelerin uygulanması, insan sağlığına ve çevreye yönelik risklerin azaltılması açısından son derece önemlidir.

Tıbbi atıkların imhası için dünya çapında farklı yöntemler ve tesisler kullanılmaktadır. Tıbbi atık yönetimi için dünya genelinde en yaygın yöntemlerden biri, yakma ve düzenli depolama alanlarıdır (Hong et al., 2018). Yakma tesisleri, gelişmekte olan ülkelerde hala tıbbi atıkların ana işleme yöntemidir ve bu ülkelerde atıkların çoğu düzenli depolama alanlarına veya hava arıtma sistemlerine sahip olmadan yakılarak imha edilmektedir (Liu et al., 2018). Otoklavlama yani sterilizasyon ise, güvenli ve etkili bir işleme yöntemi olmasına rağmen yakmaya göre pahalı kalmaktadır.

Dünya genelinde kullanılan farklı bertaraf yöntemlerinin detayları Tablo 1.6’da açıklanmıştır. ((WHO (2019); Chartier (2014). Aktaran: Singh vd., 2022))

Tablo 1.6: Tıbbi atıklar için dünya genelinde kullanılan farklı bertaraf yöntemleri

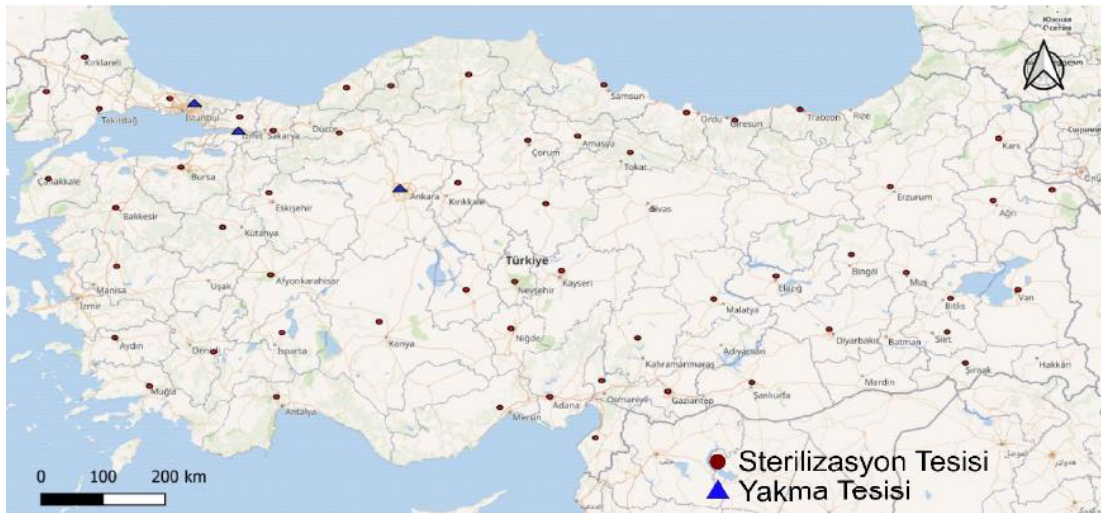
TIBBİ ATIKLAR İÇİN UYGUN ARITMA YÖNTEMLERİ								
Tıbbi Atık Türü	Yakma	Kimyasal Dezenfeksiyon	Otoklav	Mikrodalga	Kapsüllenme	Özel Gömme	Diğer	Açıklamalar ve Örnekler
Bulaşıcı Atık	+	KİSMİ OLARAK VAR	+	+	-	-	-	Laboratuvar kültürlerinden, izolasyon odalarından, dokulardan (sürüntüler), enfekte hastaların dışkılarından ve diğer patojen içeren malzemelerden kaynaklanan atıklar.
Patolojik Atık	+	-	-	-	-	-	-	İnsan dışkısından veya sıvılardan kaynaklanan atıklar ve vücut parçalarını içeren ceninler.
Kesici	+	+	-	-	-	-	-	İğneler, bıçaklar, jiletler, kırık camlar veya plastikler gibi kesici malzemelerden kaynaklanan atıklar.
İlaç	+	-	-	-	-	KİSMİ OLARAK VAR	GERİ DÖNÜŞÜM	Süresi dolmuş ilaçlar ve içinde kullanılmış ilaçlar bulunan atıklar, örneğin şişeler.
Genotoksik	+	-	-	-	-	-	GERİ DÖNÜŞÜM	Kanser tedavisinden kalma sitostatik ilaçlar, genotoksik kimyasallar veya DNA'ya zarar verebilecek maddeler içeren atıklar gibi atıklar.
Kimyasal Atık	KİSMİ OLARAK VAR	-	-	-	-	-	GERİ DÖNÜŞÜM	Laboratuvar reaktifleri, film geliştiriciler, süresi dolmuş dezenfektanlar ve çözücüler gibi kimyasal maddeler içeren atıklar
Ağır Metal İçeren Atıklar	KİSMİ OLARAK VAR	-	-	-	-	KİSMİ OLARAK VAR	-	Piller, kırık termometreler, tansiyon aletleri ve diğer ekipmanlar gibi metaller içeren atıklar.
Basınçlı Kaplar	+	KİSMİ OLARAK VAR	+	+	-	-	-	Kullanılmış bir konteyner, gaz tüpleri, gaz kartuşları, aerosol kutuları gibi.
Radyoaktif Atıklar	+	-	-	-	-	-	-	Laboratuvar deneylerinde kullanılmayan malzemeleri içeren radyoaktif atıklar, radyoaktif maddelerle temas halindekiler, kullanılmış radyonüklitlerle tedavi edilen veya test edilen hastaların idrar ve dışkıları.
(+) : ARITMA İÇİN UYGUN (-) : ARITMA İÇİN UYGUN DEĞİL								

(Gül vd., 2013), Türkiye’de kullanılan yöntemlerden biri olarak kabul edilen yakma işleminin, kuru oksidasyon işlemi olarak bilindiğini ve tıbbi atıkların yüksek sıcaklıklarda yakılarak zararsız hale getirilmesini sağladığını belirtmiştir. (Durmuşcan,2019), sterilizasyon işleminin ise bir başka yöntem olarak kabul edildiğini, burada tıbbi atıkların parçalanıp, 1 bar basınç altında yüksek sıcaklıkta kızgın buhara maruz bırakıldığını ifade etmiştir. Diğer teknikler arasında kimyasal sterilizasyon, düzenli depolama ve mikrodalga yöntemleri bulunmaktadır.

Tıbbi Atık Yönetmeliğine göre, herhangi bir kimyasal işleme tabi tutulmuş patolojik atıkların yakılarak bertaraf edilmesi zorunludur ve bu süreçte 06/10/2010 tarihli ve 27721 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmeliğe uyulması gerekmektedir. Ayrıca, Tıbbi Atık Yönetmeliğine göre, bulaşıcı ve kesici-delici atıkların sterilizasyon işlemine tabi tutularak zararsız hale getirilmesi gerektiği,

yakılan ve sterilize olan atıkların, 26/03/2010 tarihli ve 27533 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelikte tanımlanan 2. sınıf düzenli depolama alanlarında bertaraf edilebileceği ifade edilmektedir.

Eryılmaz ve Demirarslan (2020), Türkiye’deki tıbbi atık bertaraf yöntemlerini araştırmak için il bazında hazırlanan 2018 Çevre Durum Raporlarını inceleyerek, Türkiye’de tıbbi atık yönetimi için sterilizasyon ve yakma tesislerinin tercih edildiği sonucuna varmışlardır. Sterilizasyon ve yakma tesislerinin sadece İstanbul ve Kocaeli’nde olduğu, Ankara’da ise yalnızca yakma tesisi bulunduğu sonucunu çıkaran Eryılmaz ve Demirarslan (2020), 2018 yılı il bazlı Çevre Durum raporlarına göre, ülkedeki 54 ilde sterilizasyon tesisi olduğunu ancak 25 ilde hiçbir tesis bulunmadığını tespit etmişlerdir. Bu durumda, söz konusu iller topladıkları tıbbi atıkları kendi bölgelerin tesis bulunmadığı için kendi bölgelerinde bertaraf edememekte ve bunları en yakın illere göndermek durumunda kalmaktadırlar. Ayrıca Eskişehir ilinde de sadece sterilizasyon tesisi bulunmaktadır. Şekil 1.6’da Türkiye’deki tıbbi atık bertaraf tesislerinin konumları görülmektedir. İleriki bölümlerde daha ayrıntılı anlatılacağı üzere Eskişehir’de ortaya çıkan patolojik atıkların yakılıp bertaraf edilmesi için Ankara’da bulunan ITC Entegre Katı Atık Sistemleri Tesisine gönderilmektedir.



Şekil 1.6: Türkiye’deki tıbbi atık bertaraf tesisleri

1.2. Literatür Tarama

1.2.1. Tersine Lojistik Ağ Tasarımı Çalışmaları

Tersine lojistik, birçok endüstriyel ve işletme alanında önemli bir konu olarak literatürde geniş kapsamlı olarak incelenmiştir. Bu alandaki araştırmalar, çeşitli modeller ve yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Govindan, Soleimani ve Kannan (2015) tarafından yapılan literatür çalışmasına göre, tersine lojistik ağların tasarımıyla ilgili incelenen 382 çalışmanın çoğunluğu deterministik modellere odaklanmıştır, geri kalan ise stokastik modellere yönelmiştir. Ilgın ve Gupta (2010)'ya göre deterministik modeller, tersine lojistik ağlarında meydana gelen belirsizlikleri göz ardı ederken, stokastik modeller bu belirsizlikleri tersine lojistik ağ tasarımında dikkate almaktadır. Ayrıca, tersine lojistik ağ tasarımında en yaygın olarak kullanılan deterministik modelin, karmaşık tam sayılı doğrusal model olduğunu belirtmişlerdir.

Hashemi (2021)'in çalışmasında, belediye atıklarının sürdürülebilir yönetimine odaklanarak tersine lojistik ağı için çok amaçlı bir model geliştirme yolunda atılmış bir adımdır. Bulanık matematiksel programlamayı kullanarak maliyetleri minimize etmeyi ve müşteri taleplerini karşılamayı hedefleyen model, özelleştirilmiş çok amaçlı genetik algoritma ve arı kolonisi algoritması ile çözülmüştür. Algoritmaların performansı, çözüm zamanı ve etkinlik gibi faktörler göz önüne alınarak karşılaştırılmış ve arı kolonisi algoritmasının daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Araştırma, tersine lojistik ağlarındaki belirsizliklerin ele alınmasında yeni bir yaklaşım sunarak, gelecekteki çalışmalara ışık tutmaktadır.

Roudbari vd., (2021)'nin çalışmada yeniden kullanım, yeniden üretim, geri dönüşüm ve yedek parça satışı gibi çeşitli geri kazanım süreçlerini dikkate alarak bir tersine lojistik ağı tasarlanmıştır. İki aşamalı stokastik karışık tam sayılı programlama modeli kullanılarak çözüme ulaşılmıştır. Büyük ölçekli problemlerin hesaplama karmaşıklığı nedeniyle, çözüm süresini önemli ölçüde azaltabilen bir genetik algoritma ve dal-kesim algoritması ile hibrit bir algoritma geliştirilmiştir. Son olarak, algoritma bir gerçek dünya problemine uygulanarak küçük ölçekli bir laboratuvar ekipmanı üreticisi için tersine lojistik ağı tasarlanmıştır.

Kılıç vd., (2023), Türkiye'deki atık pillerin geri dönüşüm ağının verimli bir şekilde tasarlanması ile istihdam ve kalkınma hedeflerine yönelik memnuniyet seviyelerinin

değerlendirilmesini yapmıştır. Öncelikle, Kümeleme Tabanlı Analitik Hiyerarşi Süreci yöntemiyle hedefler belirlenmiş, daha sonra Çok Kriterli Topsis Sıralama ve Değerlendirme Programı modeli kullanılarak ağın genel tasarımı yapılmıştır. Sonuçlar, tasarlanan ağın istihdam ve kalkınma konularında %100 memnuniyet sağladığını göstermiştir. Ancak, karbon emisyonu minimizasyonunda %96 ve maliyet minimizasyonunda %75 düzeyinde memnuniyet elde edilmiştir. Bu bulgular, atık pillerin geri dönüşümünde karbon emisyonu ve maliyet faktörlerine daha fazla odaklanılması gerektiğini işaret etmektedir.

Zhou vd., (2023), ekspres ambalaj atıklarının neden olduğu kirlilikle mücadelede çevreci ambalajların yaygın olarak kullanılmasını ve yeşil bir tedarik zincirinin teşvik edilmesini ele almaktadır. Bu çalışmada, müşterilerden çevreci ambalajları, kuryeler aracılığıyla kapıdan kapıya geri dönüşüm yerine toplamak için çok basamaklı bir tersine lojistik ağı tasarlanmıştır. NP-zorlu olarak kabul edilen bu kapasite konum yönlendirme sorununu çözmeyi amaçlayan çalışma, müşterilere yönelik teşvik mekanizması ile bütünleşik tersine lojistik ağı için geliştirilmiştir. Kombinatorik patlamanın önlenmesi için, arama stratejilerini değiştirerek arama alanını azaltmak ve arama hızını artırmak amacıyla çok amaçlı bir hibrit genetik algoritma-tabu arama geliştirilmiştir. Önerilen model ve algoritmanın etkinliğini doğrulamak için bir dizi test örneği ve bir gerçek dünya vakası çalışmasıyla hesaplamalı deneyler yapılmıştır. Çevreci ambalajların ekonomik ve çevresel açıdan tersine lojistik ağına etkileri incelenmiş, pratik işletim ve çevreci ambalajların geniş çapta kullanımı için bir referans sunulmuştur.

Huang vd., (2023) istasyonsuz bisiklet paylaşım sistemlerindeki artan talepleri karşılayabilmek ve maliyetleri azaltmak için etkili tersine lojistik ağı tasarlamıştır. Bu çerçevede, belirsiz toplama talepleri göz önünde bulundurularak yapılan yer belirleme ve rota planlaması çalışmaları için sütun ve kısıt oluşturma tabanlı algoritmalar kullanılmıştır. Bu algoritmaların, tedarik zinciri operasyonlarında kullanılan geleneksel yöntemlere göre daha etkili sonuçlar sağladığı belirtilmektedir.

Molano (2022), ömrünü tamamlamış güneş panellerinin toplanması için tersine lojistik ağ tasarımı önermektedir. Güneş paneli teknolojilerinin sürdürülebilir enerji arzı, iklim değişikliği ile mücadele ve enerji güvenliği açısından önemini vurgulamaktadır. Ancak, güneş panellerinin yanlış atık yönetimi ve imha edilmesinden kaynaklanan çevresel etkiler endişe verici boyutlara ulaştığını vurgulamaktadır. Çalışma, Güney

Avustralya'yı analiz etmek üzere bir vaka çalışması olarak kullanmış ve mevcut güneş paneli alımı ve atık tahmini temel alınarak ömrünü tamamlamış güneş panellerinin işlenmesi ve toplanması için potansiyel stratejileri belirlemiştir. Sonuç olarak, maliyetlerin azaltılması ve daha etkin bir tersine lojistik sistemi oluşturulması amaçlanmıştır.

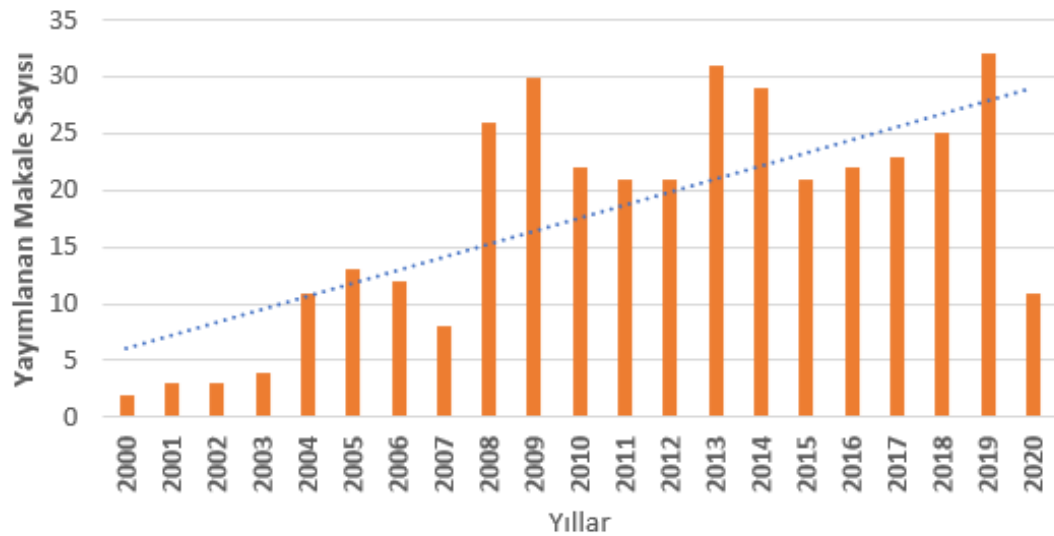
Yang ve Chen (2020) inşaat ve yıkım atıkları için tersine lojistik ağı tasarlamıştır. Bu ağın sağlamlığını arttırmanın, arz belirsizliğini hafifletme kapasitesini artırabileceğini belirtmektedir. Çin'in Şanghai şehrindeki Chongming bölgesinde bir vaka çalışması gerçekleştirmiştir. Sağlam bir karar verme modeli için Robust Optimizasyon Yöntemi kullanılmış ve modelin etkinliğini kanıtlamak için bir alt sınır sağlanmıştır. Monte Carlo Simülasyonu yapılarak elde edilen sonuçlar, karar vericinin belirsiz durumlara karşı tutumuna bağlı olarak önerilen modelin tersine lojistik ağının sağlamlığını ayarlayabileceğini göstermektedir. Bu çalışma, belirsiz durumlar altında sağlam bir tersine lojistik ağı tasarımına yardımcı olacak bir karar aracı sunmaktadır.

1.2.2. Tıbbi Atık Yönetimi ile İlgili Çalışmaların Genel Değerlendirmesi

Kailomsom ve Khompatraporn (2023)'a göre son zamanlarda tıbbi atıklardaki artış, tıbbi atık yönetimini küresel çapta bir sorun haline getirmiştir. Tıbbi atık yönetimi, normal atık yönetiminden daha maliyetlidir ve bu durum, maliyetleri azaltmaya yönelik çeşitli çalışmaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Ayrıca, tıbbi atık bertaraf prosedürleri, çevredeki topluluklara ve doğaya zarar verebilecek riskler içerdiği için önemli bir konudur.

Singh vd., (2022), Şekil 1.7' de tıbbi atık yönetimi makalelerinin sayısının grafiğini ve ülkelere göre dağılımını sunmuştur. Yayın sayısı 2000 yılında yaklaşık olarak 5'ten 2019 yılında yaklaşık olarak 30'a kadar önemli ölçüde artmıştır (Şekil 1.7a). Sonuçlar, ekonomileri dönüşüm sürecinde olan ülkelerin çoğunun, refah seviyesi yüksek ülkelerle karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha fazla yayın yaptığını göstermektedir. Asya'da, Hindistan, Çin ve İran, tıbbi atık yönetimi ve uygulamaları konusunda yayımlanan makalelerin en yüksek sayısına sahiptir. Afrika'da Nijerya, Latin Amerika'da Brezilya, Kuzey Amerika'da Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da Türkiye, yayımlanan makalelerin yüksek olduğu ülkelerdir (Şekil 1.7b).

Bu ülkelerdeki daha yüksek yayın sayısı, bu ülkelerin ciddi tıbbi atık yönetimi sorunlarına veya çevresel kirliliğe, halk sağlığına ve tıbbi atıklarla doğrudan ilişkili ekonomik zorluklar yaşadığına işaret edebilir. (İslam, 2019; Akyıldız vd., 2017; Adu-Kumi–Jonathan vd., 2019).



Şekil 1.7a: Tıbbi atık yönetimi makalelerinin sayısı (Ocak 2000 ile Mayıs 2020 arasında yayımlanan) (Singh vd., (2021))

Şekil 1.7b: Ülkelerdeki yayınların dağılımı (Singh vd., (2021))

Yapılan literatür taramasına göre son 10 yılda birçok araştırmacı sağlık atıklarının yönetimi için matematiksel programlama yöntemlerini kullanmışlardır. Bu

araştırmalar Tablo 1.7 de bulunan bazı başlıklar altında incelenmiştir. Bu çalışmada da dikkate alınan konular tabloya eklenmiştir. Literatür taraması, Eskişehir'de yapılan çalışmaların genellikle tıbbi atıkların toplanması aşamasına odaklandığını, ancak tıbbi atık yönetimi sürecinin diğer aşamalarına yönelik ayrıntılı bir analiz sunmakta sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu nedenle, Eskişehir'deki tıbbi atık yönetimi üzerine daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışması, önceki literatürdeki bu kısıtlamaları aşmayı hedefleyerek, tıbbi atık yönetiminin sadece toplama aşamasına odaklanan değil, aynı zamanda taşıma, depolama, işleme ve bertaraf gibi diğer aşamalarını kapsayan kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Ayrıca, mevcut süreçte göre, patolojik atıkların Ankara'ya gönderilmeden, Eskişehir'de yakılması için bir yakma tesisi kurulma olasılığı da incelenmiştir.

Tablo 1.7: Tıbbi atık yönetimi alanında incelenen bazı makaleler

Yazar(lar)	Model tipi	Çok amaçlı	Çok ürünlü	Çok periyotlu	Tesislerin konumu	Kapasite seviyesi	Aritma teknolojisi	Küme Kapsama	Heterojen araç	Salgın bozulması	Nüfus riski	Düzeyler				Belirsizlik			
												Atık üretim noktaları	Toplama tesisi	Aritma tesisi	Geri dönüşüm tesisi	Bertaraf tesisi	Stokastik	Bulanık	Robust
Nosrati-Abarghoee vd. [76]	MILP	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Budak ve Üstündağ [17]	MILP	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
Mantzaras ve Voudrias [67]	MINLP	-	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
Shadkam [93]	MILP	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
Shi [94]	MILP	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
Shi vd. [95]	MILP	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-
Balcı vd. [11]	MILP	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	-	-
Wang vd. [104]	MINLP	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
Govindan vd. [43]	MILP	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	-
Govindan vd. [42]	MILP	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-
Yu vd. [111]	MILP	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-
Kargar vd. [58]	MILP	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+
Sara ve Btissam [90]	MILP	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
Joneghani vd. [55]	MILP	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
Torkayesh vd. [100]	MILP	+	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-
Kailomsom ve Khompataporn [56]	MILP	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	+	-	-
Homayouni ve Pishvae [50]	MILP	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+
Pishvae [82]	MINLP	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Aydemir-Karadağ [10]	MINLP	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-
Bu çalışma	MINLP	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-

MILP: Karışık Tam Sayılı Doğrusal Programlama; MINLP: Karışık Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama

1.2.2.1.1. Tıbbi Atık Tersine Lojistik Ağ Çalışmaları – Tek Amaçlı

Budak ve Üstündağ (2017), Türkiye'deki sağlık kuruluşlarındaki atık toplama, taşıma ve bertaraf ile ilgili optimal konum-atama kararları için tersine lojistik yöntemlerini uygulayarak, modelin etkinliğini ve uygulanabilirliğini doğrulamışlardır. Yaptıkları

tek hedefli, çok dönemli ve çok ürünli MILP (Karışık Tam Sayılı Doğrusal Programlama) modeli ile toplam maliyeti en azlayarak sağlık hizmetlerinde verimli atık yönetimi için tesislerin optimal sayısını ve konumlarını belirlemek üzere bir tersine lojistik ağı tasarlamışlardır. Atık miktarlarının artışının modele etkisini incelemek için bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Artan atık miktarlarına göre tesis değişiklik sayıları analiz edilmiş ve stratejiler belirlenmiştir.

Mantzaras ve Voudrias (2017) Doğu Makedonya-Trakya Bölgesi, Yunanistan'da bulaşıcı tıbbi atık toplama, taşıma ve imha sürecinin toplam maliyetini azaltmak için bir Genetik Algoritma ve Monte Carlo Simülasyonu kullanarak Doğrusal Olmayan bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Toplam maliyet, işleme tesisi, atık transfer tesisleri, atık taşıma ve transfer araçları, ayrıca atık toplama konteynerleri ile hastane kutularının sermaye ve işletme maliyetlerini kapsamaktadır. Transfer tesislerinin optimal konumlarını, tasarım kapasitelerini, tedavi tesislerinin sayısını, tüm atık toplama, taşıma ve transfer araçlarının sayı ve kapasitelerini, optimum taşıma yolunu ve yönetim sistemindeki tıbbi atık maliyetini hesaplamışlardır. Tüm tesislerin aday konumları GIS (Coğrafi Bilgi Sistemi) tabanlı yöntem kullanılarak belirlenmiştir.

Shadkam (2021), COVID-19 atık yönetimi ve özellikle aşı atıklarını yönetmek için hem ileri yönlü hem de ters yönlü lojistiği dikkate alan bir MILP ağ modeli tasarlamıştır. Önerilen modelde, üretim ve dağıtım süreci, tüketiciler ve tıbbi atıkların toplanması ve geri dönüştürülmesi süreci olmak üzere üç ana bölüm düşünülmüştür. Aşıların güvenli şekilde taşınması ve depolanması için kullanılan konteynerlerin geri dönüşümü ve üretim döngüsüne tekrar kazandırılmasında model büyük ölçüde yardımcı olacaktır. Sabit maliyetler, malzeme akış maliyetleri ve potansiyel tesislerin inşaa maliyetleri ile ilişkilendirilen maliyetler minimize edilmiştir. En güçlü Meta-Sezgisel Algoritmalarından biri olan Cuckoo Optimizasyon Algoritması kullanılarak çözüme ulaşılmıştır. Problemin sonuçları Cuckoo Optimizasyon Algoritması'nın iyi bir performans gösterdiğini kanıtlamıştır.

Shi (2009), tıbbi atık yönetimi için hastaneler, toplama tesisleri, işleme tesisleri ve diğer tesisler arasında bir tersine lojistik ağı oluşturmak için bir karışık tam sayılı model geliştirmiştir. Bu model, toplama ve işleme tesislerinin sayılarını ve konumlarını belirleyerek, toplam maliyetleri (taşıma, tesis kurma, işleme maliyetleri) en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Shi vd.,(2009), tıbbi atıkların yönetimi için hastaneler, toplama tesisleri, işleme tesisleri ve diğer tesislerden oluşan bir tersine lojistik ağı oluşturmak amacıyla karışık tam sayılı bir model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modeli genetik algoritma kullanarak çözümlenmişlerdir. Model, taşıma maliyeti, toplama tesislerinin kurulum maliyeti ve işleme tesislerindeki işleme maliyetlerini minimuma indirme hedefiyle oluşturulmuştur. Modelin geçerliliğini ve etkinliğini doğrulamak için örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

1.2.2.1.2. Tıbbi Atık Tersine Lojistik Ağ Çalışmaları – Çok Amaçlı

Balcı vd., (2022) COVID-19 pandemisi süresince ve sonrasındaki 10 yıl boyunca, yoğun nüfuslu İstanbul'un 39 ilçesinde üretilen tıbbi atıkların etkili bir yönetimini sağlamak amacıyla çok amaçlı bir tersine lojistik ağı tasarlamışlardır. Uygulanan MILP modeli ile sürdürülebilir kalkınma hedefleri içinde ekonomik, çevresel ve sosyal amaçları entegre etmeye çalışılmıştır. İstanbul için tahmini tıbbi atık miktarını göz önünde bulundurarak personel sayısını ve devlet gelirini maksimize etmeyi, aynı zamanda toplam sabit maliyeti, karbon emisyonları maliyetini ve taşıma maliyetini minimize etmeyi amaçlamaktadır. Problem çözümünde birbirleriyle çelişen farklı amaçlar arasındaki dengeyi araştırmak için en sık kullanılan yöntemlerden biri olan Hedef Programlama Yaklaşımı kullanılmıştır. Hedef programlama probleminin çözümünde çok sayıda amaç fonksiyonunun tek amaçlı bir fonksiyona dayandığı Ağırlıklı Toplam Metodu kullanılmıştır.

Wang vd., (2019), Şangay'daki üçüncü seviye A sınıfı hastanelerde ortaya çıkan tıbbi atıkların tersine lojistik ağlarının tesis tahsis kararlarını optimize etmeyi amaçlayan bir araştırmayı ele almaktadır. İki aşamalı bir tersine lojistik ağ tasarımı modellemişlerdir. İlk aşama belirli hastanelerin çoklu dönemlerdeki tıbbi atık miktarının Gri Tahmin Modeli ile tahminini içerir. İkinci aşamada tesis tahsis kararları için işletme maliyetlerini ve çevresel etkiyi en aza indirmeyi amaçlayan çok amaçlı bir MINLP modeli geliştirmişlerdir. Ağırlıklı Toplam Metodu ile çok amaçlı optimizasyon modelini tek amaçlı optimizasyon modeline dönüştürmüşlerdir. İki aşamalı olarak modelin tasarlanması dinamik bir yaklaşım oluşturmuştur. Ağ performansı üzerindeki etkilerini analiz etmek için önemli parametrelerin duyarlılık analizi yapılmıştır. Araştırmanın sonuçları, çoklu dönemli konum modelinin etkili bir tasarımına sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Govindan vd., (2016), çok aşamalı, çok dönemli, çok amaçlı bir tersine lojistik ağı tasarlamak amacıyla belirsiz parametrelerle başa çıkmak için Bulanık Matematiksel Programlamayı kullanırken özel bir MOPSO (Çok Amaçlı Parçacık Sürüş Optimizasyonu) algoritması uygulamışlardır. Sürdürülebilirlik açısından tasarımda çevresel etkiyi azaltma, sosyal sorumluluk derecesini artırma ve maliyeti azaltma gibi üç önemli amacı göz önünde bulundurmuşlardır. Önerilen çözüm prosedürünün geçerliliği, dört karşılaştırma metriği ve varyans analizi kullanılarak küçük ve büyük ölçekli test problemlerinde analiz edilmiştir. Önerilen modelin uygulanabilirliğini ve çözüm prosedürünün pratikliğini göstermek amacıyla model İran'daki bir tıbbi şırınga ve iğne üreticisinin sağladığı gerçek bir örneğe uygulanmıştır.

Govindan vd., (2022), tıbbi atık yönetimi için çok ürünlü, çok dönemli ve çok amaçlı MILP modeli geliştirmişlerdir. Bu model, atık miktarındaki belirsizliği göz önünde bulundurarak yeşil bir tersine lojistik ağı tasarlamayı hedeflemektedir. Önerilen modelin amacı ekonomik olarak toplam maliyeti ve sosyal olarak nüfus riskini en aza indirmektir ve çözüm metodu olarak AUGMECON2 (Geliştirilmiş Bir Epsilon-Kısıtlama Yöntemi) kullanılmıştır. Arıtma tesislerinde bulaşıcı atık taşıyan kamyonların bekleme süresini yönetmek için ilk kez Kuyruk Teorisi kavramı uygulanmıştır. Ayrıca, önerilen model aynı anda tesislerin konumunu ve heterojen araç rotalamasını ele almaktadır ve atık oluşumundaki belirsizlikle başa çıkmak için Stokastik Senaryo Tabanlı bir Yaklaşım kullanmaktadır. İran'ın Elburz Eyaletinde altı hastane ve çeşitli potansiyel tesislerden elde edilen verilerle modelin performansı değerlendirilmiştir.

Yu vd., (2020), salgın hastalıklar patlak verdiğiğinde artan medikal atıkların etkili bir şekilde yönetimi için tasarlanmış bir tersine lojistik ağının çok amaçlı, çok dönemli bir MIP (Karışık Tam Sayılı Programlama) modelini çalışmışlardır. Modelin amaç fonksiyonunda kaynaklardaki risk, tıbbi atıkların taşınma ve işleme riskini ve toplam maliyeti minimize etmek bulunmaktadır. Çok amaçlı optimizasyon problemini çözmek ve etkili Pareto optimal çözüm kümesi oluşturmak için etkileşimli bir Bulanık Yaklaşım kullanılmıştır. Çalışmanın uygulama örneği, Wuhan, Çin'deki 2019 koronavirüs salgınına dayanmaktadır. Bu araştırmanın yapıldığı dönemde COVID-19'un gelecekteki yayılma eğiliminin belirsizliği çok yüksek olmasına rağmen, hesaplamalı deneyler ve nicel analizlere dayanarak bir dizi genel politika önerisi elde edilebilmiştir. Sonuçlar COVID-19 salgını sırasında medikal atıkların muazzam bir

artışını yönetmek için geçici yakma tesislerinin kurulmasının etkili bir çözüm olabileceğini ancak bu geçici yakma tesislerinin konum seçiminin önemli olduğunu göstermektedir.

Kargar vd., (2020), tıbbi atık tersine lojistik ağı tasarlamak için bir MILP modeli geliştirmişlerdir. Önerilen model, üç amaç fonksiyonuna sahip, çok ürünlü ve çok dönemli bir modeldir. Birinci amaç fonksiyonu toplam maliyetleri en aza indirir, ikinci amaç fonksiyonu en iyi arıtma teknolojisi seçimiyle ilgilidir ve üçüncü amaç fonksiyonu depolanan toplam tıbbi atığı en aza indirir. Modeldeki kesin olmayan parametreleri ele almak için sağlam bir Dayanıklı Olasılıksal Programlama Yaklaşımı kullanılmış ve çok amaçlı bir model oluşturmak için Bulanık Hedef Programlama Yöntemi kullanılmıştır. Tesislerin konumu ve kapasitesi ve arıtma teknolojisi türü gibi farklı özellikleri ve sorunları içeren önerilen modelin potansiyelini göstermek için İran'ın kuzey şehirlerinden Babol şehrinde tıbbi atık ağına dair gerçek bir vaka çalışması yapılmıştır.

Sara ve Btissam (2020), tıbbi atık yönetiminin bir örneğini inceleyerek yeşil tersine lojistik ağı problemi sunmuş ve ağın hem toplama, işleme, tıbbi atıkların geri dönüştürülmesi ve her seviye arasındaki taşıma dahil olmak üzere tersine lojistik maliyetini hem de sistem genelinde oluşan çevresel emisyonları en aza indirmek amacıyla çok amaçlı ve çok ürünlü bir model geliştirmişlerdir. Bu çalışma ile literatürde ilk kez ekonomik ve çevresel boyutları dikkate alan çok amaçlı ve çok ürünlü tıbbi atık geri dönüşü modeli geliştirmiştir. Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile Hibrit Çoklu Ajan Sistemini kullanılmıştır.

Abarghooee vd., (2023), sağlık hizmetleri atıklarını yönetmek amacıyla belirsizlikleri ve salgın aksaklıklarını göz önüne alarak bir tersine lojistik ağı tasarlamak için çok amaçlı bir MILP modeli formüle etmişlerdir. Bu çalışmada, ilk kez salgın aksaklıkları, kapasite seviyesi, küme örtme, arıtma teknolojisi ve nüfus riski gibi kavramlar, bulaşıcı ve bulaşıcı olmayan sağlık atıklarını yönetmek amacıyla tersine lojistik ağı tasarlamak için aynı anda kullanılmıştır. Monte Carlo Simülasyon Metodu, salgın aksaklıklarını değerlendirmek amacıyla kullanılmış ve bu yöntemle çeşitli senaryolara göre üretilen atık miktarları simüle edilmiştir. Önerilen çok amaçlı modelin çözümü için, Bulanık Hedef Programlamasına dayalı özgün bir çözüm stratejisi geliştirilmiştir. Model toplam maliyetleri ve nüfus riskini aynı anda en aza indirmektedir. Ayrıca

modelin ve çözüm yaklaşımının etkinliği, amaç fonksiyonlarının katsayıları üzerinde duyarlılık analizi süreci kullanılarak doğrulanmıştır.

Erdem (2022), COVID-19 salgını sırasında tehlikeli tıbbi atık toplama hizmetleri için sürdürülebilir bir ağ tasarlamayı amaçlamıştır. Elektrikli araç filosu için en uygun rotaları ve listeleri oluşturmanın yanı sıra şarj teknolojileri, zamanları ve konum seçimlerini de kapsayacak şekilde bir elektrikli tıbbi atık toplama aracı rotalama problemi tanıtılmıştır. Bu problem, sürdürülebilir kalkınmaya ulaşmak için çevresel ve ekonomik boyutları kapsayacak şekilde çok amaçlı olarak modellenmiştir. Çevresel boyut olarak sıfır emisyonlu atık yönetimi lojistiği sağlarken tehlikeli tıbbi atıkların sağlık riskinin en aza indirilmesi, ekonomik boyut olarak maliyetin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Sonuçlar, farklı şarj cihazı türlerinin karma kullanımının, yalnızca tek bir şarj cihazının kullanılması durumuna kıyasla toplam enerji maliyetini ve taşıma riskini azaltabileceğini göstermiştir. ALNS'ye (Uyarlanabilir Büyük Mahalle Araması) dayalı Meta-Sezgisel Algoritma içeren hibrit bir çözüm önerilmiştir.

Joneghani vd., (2022), tıbbi atık yönetiminde sürdürülebilir konum tahsisi sorununu ele almak için belirsizlik altında çok amaçlı ve çok dönemli bir ağ tasarlamak için MILP modeli önermişlerdir. Önerilen modelde, kapsamlı bir atık yönetim tesisleri ağı için arıtma tesislerinin yerleri ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlara göre belirlenmiştir. Gelir ile operasyonlar, inşaat ve ulaşım dahil genel sistem maliyetleri arasındaki fark ekonomik amaç fonksiyonunda en aza indirilir. Çevresel amaç fonksiyonu, atıkların taşınması ve işlenmesinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltır. Ayrıca sosyal amaç fonksiyonu, tesis kurulumunun bir sonucu olarak topluma sağlanan faydaları en üst düzeye çıkarmaya çalışır. Ayrıca elektrik üretimi de dikkate alınmaktadır. Olasılıksal Programlama, parametrelerin belirsizliğiyle başa çıkmak için kullanılmıştır ve sorunu çözmek için Etkileşimli Bulanık Yaklaşım da kullanılmıştır. Model İran'ın Çaharmahal ve Bahtiyari Eyaleti'nde uygulanmıştır. Modelin uygulanmasından elde edilen bulgular, geri dönüşüm ve atıktan enerjiye dönüştürmeden elde edilen gelirin, atık yönetim sistemi harcamalarının önemli bir kısmını karşılayabildiğini göstermektedir.

Torkayesh vd., (2021), ekonomik boyut olarak toplam maliyeti en aza indirme, çevresel boyut olarak çevresel riskleri ve emisyonları en aza indirme ve sosyal boyut olarak iş yaratımını maksimuma çıkarma olmak üzere çok amaçlı bir tıbbi atık yönetimi problemi modeli geliştirmişlerdir. Modelin çözümü için IMCGP

(Geliştirilmiş Çoktan Seçmeli Hedef Programlama Yaklaşımı) önerilmiş ve bu daha sonra GAM (Hedefe Ulaşma Yöntemi) ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilmiş Çoktan Seçmeli Hedef Programlama Yaklaşımı'nın daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, yapılan analiz sonuçları, amaç fonksiyonlarının anahtar parametrelerdeki dalgalanmalara, yani ağ içindeki atık talebi ve akış hızlarına duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, yöneticilerin karar alma süreçlerinde bu faktörleri göz önünde bulundurmalarının kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır.

Kailomsom ve Khompatraporn (2023), bulaşıcı tıbbi atık yönetimine yönelik etkili stratejilerin tasarlanmasına katkıda bulunmak üzere ekonomik, sosyal ve çevresel hedefleri içeren çok amaçlı bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Ekonomik hedef, aktarma ve bertaraf tesislerinin inşaat ve işletme maliyetlerini içerir. Sosyal hedef, bertaraf tesislerini çevreleyen toplumları göz önünde bulundururken, çevresel hedefte taşıma ve yakma işleminde ortaya çıkan karbondioksit emisyonunu ölçü olarak kullanılmıştır. Model, atık aktarma tesislerini kullanarak maliyetleri düşürmeyi önermekte ve Leksikografik Ağırlıklı Tchebycheff Yöntemine dayalı olarak revize edilerek Pareto sınırındaki optimal çözümleri elde etmeyi amaçlamaktadır. Tayland'daki bir sağlık bölgesine uygulanmıştır. Çeşitli senaryolarda gösterdiği performansla bulaşıcı tıbbi atık yönetiminde stratejik karar alma süreçlerine ışık tutmaktadır. Ek avantajları incelemek için günlük ve her iki günde bir atık toplama aralıkları karşılaştırılmıştır. Her iki günde bir atık toplama aralığı uygulanırsa genel maliyetlerin azaltılabileceği görülmüştür.

Hejrani ve Hoo Sang (2013), tıbbi atık yönetimi için yenilikçi bir tersine lojistik modeli geliştirmiştir. Bu model, maliyetlerin yanı sıra risk faktörlerini de dikkate alarak karmaşık bir tam sayılı doğrusal programlama modeli içermektedir. Çalışma, tıbbi atık yönetim ağlarında optimal dağıtım kararlarını verme amacıyla maliyetlerin ve risklerin minimize edilmesini hedeflemiştir. Bu karmaşık problemi çözmek için maliyetleri ve riskleri minimize eden bir Genetik Algoritma da geliştirilmiş ve matematiksel modelle karşılaştırılmıştır. Farklı senaryolar ve yaklaşımlarla önerilen model ve algoritmanın etkinliği değerlendirilmiştir. Bu çalışma, tıbbi atık yönetiminde matematiksel modelleme ve genetik algoritma kullanarak özgün bir yaklaşım sunmaktadır.

Homayouni ve Pishvae, (2019), hastane atıklarının toplanması ve imha edilmesi için özel bir koleksiyon ve bertaraf sistemi tasarlamak üzere çok amaçlı Robust Optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Hedefler, toplam maliyeti (taşıma ve işletme

maliyetlerini içerir) ve taşıma ile işletme risklerinin toplamını aynı anda minimize etmektir. Önerilen çift amaçlı modeli çözmek için Artırılmış ε -kısıt Metodu kullanılmıştır. Ayrıca, modelin doğruluğu farklı boyutlarda çözülen birkaç test problemi ve belirsizlikle başa çıkmak için Robust Modelin analizi yoluyla belirlenmiştir. Son olarak, araştırmanın metodolojisinin uygulanabilirliğini göstermek için bir gerçek durum çalışması yapılmıştır.

Pishvae vd, (2014), çelişen ekonomik, çevresel ve sosyal amaçları göz önünde bulundurarak belirsizlik altında sürdürülebilir bir tıbbi tedarik zinciri ağı tasarlamak için çok amaçlı bir Olasılıksal Programlama Modeli önermiştir. Modelde, ilgili çevresel ve sosyal etkileri tahmin etmek için etkili sosyal ve çevresel yaşam döngüsü değerlendirme tabanlı yöntemler kullanılmıştır. Önerilen modelin çözümündeki hesaplama karmaşıklığını ele almak için üç etkili hızlandırma mekanizmasını kullanan hızlandırılmış Benders Ayrışım Algoritması geliştirilmiştir. Bir tıbbi endüstri vaka çalışması kullanılarak ve hesaplama analizi sunularak önerilen modelin önemi ve hızlandırılmış Benders ayrışım algoritmasının etkinliği gösterilmiştir.

1.2.2.1.3. Tıbbi Atık Tersine Lojistik Ağ Çalışmaları – Eskişehir

Eskişehir'de tıbbi atık yönetimi konusunda yapılan literatür taramasına göre, daha önce bahsedildiği üzere mevcut çalışmaların tıbbi atık toplama süreçleri üzerine odaklandığını göstermektedir. Bu bağlamda, önceki araştırmalar, tıbbi atıkların etkili bir şekilde toplanması için rotalama problemlerini ele almıştır. Aşağıda bu araştırmaların detayları verilmektedir, böylelikle bu tez çalışmasının Eskişehir'de önceki çalışmalardan nasıl farklılaştığı daha iyi kavranabilir.

Baran (2017), Eskişehir'deki hastanelerden tıbbi atık toplama sürecinde etkili rota belirleme amacıyla matematiksel bir model geliştirmiştir. Genelleştirilmiş çok amaçlı araç rota modeli, atık toplama sürecini kapsamlı bir şekilde ele alarak, amaç fonksiyonları aracılığıyla minimum mesafe ve saatte minimum sürüş hızını içermektedir. Problemin amaçları Skalarizasyon Yöntemleriyle (Ağırlıklı Toplam Metodu, Epsilon Kısıtlama Yöntemi, Hibrid Yöntem, Elastik Kısıtlama Yöntemi, Benson Yöntemi, Genişletilmiş Ağırlıklı Tchebycheff Fonksiyon Yöntemi ve Konik Skalarizasyon Yöntemi) birleştirilip hangi yöntemin daha etkili olduğu incelenmiştir. GAMS programı tarafından hesaplanan sonuçlara göre, çok amaçlı araç rotalama

problemi için en etkili Skalarizasyon Yönteminin Genişletilmiş Ağırlıklı Tchebycheff Fonksiyon Yöntemi olduğu analiz edilmiştir. Ayrıca Epsilon Kısıtlama Yönteminin de çok etkili bir Skalarizasyon Yöntemi olduğu görülmüştür.

Arapoğlu (2020), tıbbi atık toplama sürecinde verimliliği artırmak için bir matematiksel model oluşturmuştur. Problem, Eskişehir ilinin en büyük 10 tane özel ve kamu sağlık kuruluşu için çözülmüştür. Tıbbi atık toplama sorunu, klasik bir kapasiteli Araç Rotalama Problemi şeklinde tanımlanmıştır. Geliştirilen model, GAMS programı kullanılarak küçük bir örnekte optimal bir şekilde çözülmüş ve her araç için optimize edilmiş rotalar üretmiştir. Elde edilen sonuçlar, mevcut uygulamayla karşılaştırılmış ve toplam mesafede önemli bir azalmanın sağlandığı tespit edilmiştir.

Banar vd., (2008), Eskişehir ilindeki 45 sağlık enstitüsündeki tıbbi atıkların araç toplama rotalarını optimize ederek işletme maliyetini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Coğrafi Bilgi Sistemi ve araç rotalama yazılımı kullanılarak hızlı ve efektif sonuçlara ulaşılmıştır. Tasarlanan araç toplama rotaları, haftalık mesafede azalma sağlamıştır. Bu sonuçlar, rotalarının maliyet ve süreyi en aza indireceğini ortaya koymaktadır.

2. METODOLOJİ VE PROBLEM TANIMI

Çalışmanın bu kısmında oluşturulan optimizasyon probleminin nümerik metodolojisi ve içeriği izah edilecektir. Problem MIP olarak ele alınmıştır. Bunun sebebi problemin içerisinde sürekli değişkenler ve tam sayılı değişkenlerin birlikte kullanılmasıdır. MIP, üretim planlaması, rota optimizasyonu, paletleme problemleri gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu yöntem, tam sayılı değişkenlerin kullanılmasıyla ilgili problemleri çözmek için etkilidir ve literatürde çeşitli uygulama örnekleri bulunmaktadır. Problem içerisinde çeşitli karar değişkenleri tanımlanıp tıbbi atık hayat döngüsünün başından sonuna kadar gerçekleşen olaylar detaylıca izah edilecektir.

Kısıtlar ile birlikte problem çok amaçlı optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Birinci amaç fonksiyonu tıbbi atık süreçlerinin maliyet minimizasyonunu sağlamaya çalışırken ikinci amaç fonksiyonu ise emisyon salınımı miktarını minimize etmeye çalışmaktadır. Bu problem özelinde bu iki amaç fonksiyonunun birbirine karşıt olarak çalıştığı söylenebilir. Detaylar ilerleyen kısımlarda izah edilmektedir.

Literatür araştırması sırasında 2' den daha fazla çelişen amaç fonksiyonlarının da kullanıldığı görülmüştür. Fakat elde edilen bilgiler ile bu çalışma özelinde 2 adet amaç fonksiyonu yeterli bulunmuştur. Gelecek çalışmalarda daha fazla amaç fonksiyonları tanımlanıp problem genişletilebilir.

Tanımlanan MINLP problemi doğrusal olmayan programlama nümerik yöntemleri ile çözülmüştür. Çözüm için GAMS 45.5.0 programı kullanılmıştır. Bütün karar değişkenleri, ilgili kısıtlar ve amaç fonksiyonu matematik modelleri programa girilmiş ve hesaplamalar icra edilmiştir. Bir sonraki kısımda GAMS programının kullandığı nümerik metodolojiden bahsedilecektir.

2.1. MIP Yöntemleri: MILP ve MINLP

MIP problemleri, birçok gerçek dünya uygulamasında karşımıza çıkan optimizasyon problemlerini modellemek için kullanılır. Örneğin, üretim planlaması, lojistik yönetimi, tesis yerleşimi gibi alanlarda sıklıkla kullanılır.

Matematiksel olarak, bir MIP problemi genellikle aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\text{En azla } f(x) \quad (2.1)$$

$$\text{Öyle ki } g_i(x) \leq 0 \quad (2.2)$$

$$h_i(x) = 0 \quad (2.3)$$

$$x_i \geq 0 \quad (2.4)$$

$$y_i \geq 0 \quad (2.5)$$

Burada:

- $f(x)$ amaç fonksiyonunu temsil eder, Amacımız bu fonksiyonu bu örnek için en azlamaktır.
- $g_i(x)$ ve $h_j(x)$, sırasıyla, eşitsizlik ve eşitlik kısıtlarını ifade eder. Örneğin, bir üretim planlaması probleminde, her bir ürünün üretim miktarının belirli bir aralıkta olması gerekebilir.
- x_i sürekli (reel sayı) değişkenleri ve y_i tam sayı değişkenleri temsil eder. Bu değişkenler, genellikle problemin kısıtları altında optimize edilmek üzere belirli değerler alacak olan karar değişkenleridir. Örneğin, bir üretim planlaması problemi için ürün miktarları veya bir rota planlaması problemi için rotalardaki taşıma miktarları gibi.

MIP modellerini doğrusal (MILP) ve doğrusal olmayan (MINLP) şeklinde iki başlıkta incelenebilir.

Hooker (2010)'a göre bir MILP problemi, doğrusal eşitsizlik kısıtlamaları ve bir doğrusal amaç fonksiyonu içerir. Bazı değişkenlerin tam sayı değerler alması gerekmektedir; diğer değişkenler ise sürekli. Bu tür bir problem, basit olarak aşağıdaki formatta yazılabilir:

$$\begin{aligned} \text{En azla (ya da en çokla)} \quad & cx \\ & Ax \geq b \end{aligned} \quad (2.6a)$$

$$x \in \mathbb{R}^n, \quad x_j \in \mathbb{Z} \text{ for } j \in J \quad (2.6b)$$

Burada $x = (x_1, \dots, x_n)$ ve A bir $m \times n$ matrisidir. J kümesindeki x_j değişkenleri tam sayı değerler almalıdır. Burada amaç (a) ve (b) kısıtlarını sağlarken cx amaç fonksiyonunu en azlamaktır (ya da en çoklamaktır).

Sahinidis (2019)'a göre MINLP, sürekli ve tamsayı değişkenlerle doğrusal olmayan sorunları ele alan optimizasyon alanıdır. MINLP içerisindeki "Doğrusal Olmayan" kısım, amaç fonksiyonunun veya kısıtların doğrusal olmadığı anlamına gelir. Yani, problemdeki en az bir kısıtlama veya amaç fonksiyonu değişkenlerin karesi, üstel terimler, trigonometrik fonksiyonlar, farklı model değişkenlerinin birbiri ile çarpılması ya da bölünmesi işlemleri gibi doğrusal olmayan matematiksel ifadeler içerebilir. Bazaraa vd. (2013) doğrusal olmayan matematiksel ifadeleri ayrıntılı bir şekilde açıklamışlardır. Ayrıca, Kılınç ve Sahinidis (2017) tarafından yapılan incelemede belirtildiği gibi, MINLP uygulama alanları birçok alana yayılmıştır. Bu alanlar arasında kimyasal işlemlerin tasarımı ve kontrolü, planlama ve programlama, ağ tasarımı, düzen tasarımı, portföy optimizasyonu ve enerji sistemleri bulunmaktadır. Lee ve Leyffer (2011), basit olarak MINLP problemlerini aşağıdaki şekilde ifade etmişlerdir:

$$\text{En azla } f(x) \quad (2.7)$$

$$\text{Öyle ki } g_i(x) \leq 0, \forall i \in J \quad (2.8)$$

$$x_i \geq 0, x_i \in R \quad (2.9)$$

$$y_i \geq 0, y_i \in N \quad (2.10)$$

Burada J kümesi doğrusal olmayan kısıtları temsil etmektedir.

Denklem (2.11) ve (2.12) matematiksel denklemleri içeren örnek bir MINLP problemini göstermektedir:

$$\text{En azla } f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 \quad (2.11)$$

$$\text{Öyle ki } g(x_1, x_2) = \sin(x_1) + \sin(x_2) < 5 \quad (2.12)$$

Denklem (2.11) ve (2.12)'den anlaşılabileceği üzere problemin amaç fonksiyonundaki ve kısıtlarındaki karar değişkenlerinin farklı kombinasyonlar ile kullanımı problemi doğrusal olmayan hale getirmektedir.

GAMS içerisinde bu tarz MINLP problemlerini çözmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler Tablo 2.1’ de gösterilmektedir.

Tablo 2.1: GAMS içerisindeki bazı MINLP çözüm yöntemleri (GAMS Theory Manual)

	LP	MIP	NLP	MCP	MPEC	CNS	DNLP	MINLP	QCP	MIQCP
ALPHAEC								✓		✓
ANTIGONE			✓			✓	✓	✓	✓	✓
BARON	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓
CBC	✓	✓								
CONOPT 3	✓		✓			✓	✓		✓	
CONOPT 4	✓		✓			✓	✓		✓	
COPT	✓	✓							✓	✓
CPLEX	✓	✓							✓	✓
DECIS	✓									
DICOPT								✓		✓

MINLP çözüm algoritması olarak GAMS tarafından geliştirilen DICOPT (Ayrık ve Sürekli Optimize Edici) yöntemi tercih edilmiştir. DICOPT, doğrusal ikili veya tam sayılı değişkenler ile doğrusal ve doğrusal olmayan sürekli değişkenleri içeren MINLP problemlerini çözmek için kullanılan bir modeldir. MINLP optimizasyon problemlerinin modelleme ve çözümü, henüz doğrusal, tam sayılı veya doğrusal olmayan programlama modellemesinde elde edilen olgunluk ve güvenilirlik seviyesine ulaşmamış olsa da bu problemlerin hala geniş uygulama alanları bulunmaktadır. Program, dış yaklaşım algoritmasının eşitlik gevşeme stratejisi için genişletmelerine dayanmaktadır. DICOPT içindeki MINLP algoritması, bir dizi NLP (Doğrusal Olmayan Programlama) ve MIP alt problemini çözer. Bu alt problemler, GAMS altında çalışan herhangi bir NLP veya MIP çözücüsü kullanılarak çözülebilir. Performans, seçilen alt çözücülerin seçimine büyük ölçüde bağlı olacaktır.

DICOPT algoritmasının çalışma şekli aşağıdaki gibi özetlenebilir. Öncelikle DICOPT algoritması aşağıdaki verilen formlardaki denklemleri çözmeye uygundur:

$$\text{En azla } f(x, y) \quad (2.13)$$

$$\text{Öyle ki } g(x, y) \sim b \quad (2.14)$$

$$l_x \leq x \leq u_x \quad (2.15)$$

$$y \in [l_y], \dots,]u_y[\quad (2.16)$$

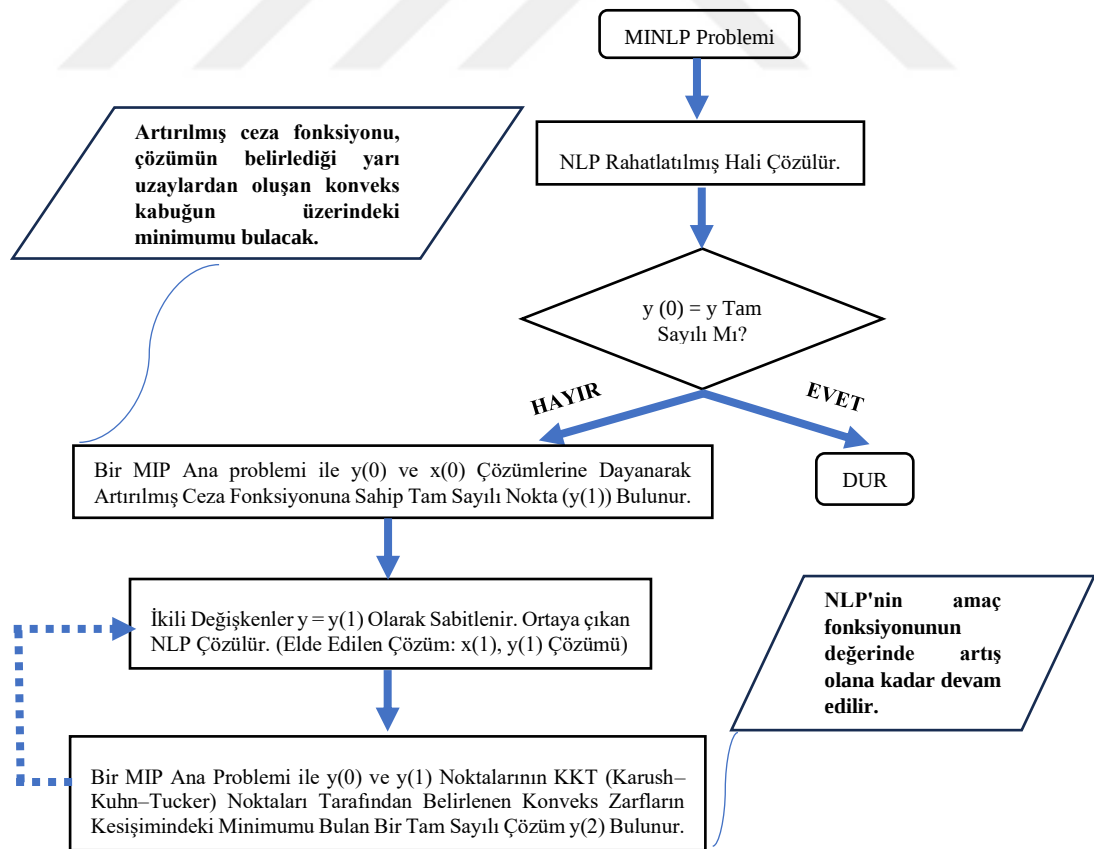
Burada x sürekli değişkenler ve y tam sayılı değişkenlerdir. $\sim$ sembolü, bir ilişkisel operatörler vektörünü göstermek için kullanılır. Kısıtlamalar hem doğrusal hem de doğrusal olmayan olabilir. Değişkenlerin sınırları doğrudan ele alınır. $[x]$, x 'ten büyük veya eşit olan en küçük tam sayıyı ve u_x 'yi temsil eder. Benzer şekilde, $]x]$, x 'ten küçük veya eşit olan en büyük tam sayıyı ve l_x 'yi temsil eder. Tam sayılı değişkenler ya tam sayı değişkenleri ya da ikili değişkenler olabilir. DICOPT algoritması üç temel fikre dayanır:

- Dış Yaklaşım (Outer Approximation)
- Eşitlik Rahatlatması (Equality Relaxation)
- Arttırılmış Cezalandırma (Augmented Penalty)

Dış Yaklaşım, bir konveks fonksiyon tarafından tanımlanan yüzeyin, yüzeyin iç noktasında herhangi bir dış düzlem üzerinde yattığını ifade eder. (1-boyutta, bir konveks fonksiyonun iç bir noktasındaki teğet çizgisinin eğrisinin altında olduğu benzer geometrik sonuçtur). Algoritma içinde dış yaklaşımlar, her bir iterasyonda doğrusallaştırmalar üretilerek elde edilir ve ardışık olarak geliştirilmiş doğrusal yaklaşımlar sağlamak üzere biriktirilir. Bu doğrusal yaklaşımlar, hedef fonksiyonu küçümseyen ve izin verilen bölgeyi abartan doğrusal olmayan konveks fonksiyonların ardışık olarak geliştirilmiş doğrusal yaklaşımlarını sağlar.

Arttırılmış Cezalandırma, sadece tanımlanan eşitsizlik kısıtlamalarının sağ taraflarına (sıfırdan büyük olmayan) fazlalık değişkenlerinin eklenmesini ve konvekslik varsayımlarının geçerli olmadığı durumlarda amaç fonksiyonunun değiştirilmesini ifade eder.

DICOPT'un temel algoritması, ikili değişkenler üzerindeki 0-1 koşullarının gevşetildiği bir NLP'nin çözülmesiyle başlar. Bu problemdeki çözüm tam sayılı bir çözüm üretirse, arama durur. Aksi takdirde, MILP olarak adlandırılan ana problemler ve bunlara karşı sıralı bir dizi NLP alt problemleriyle devam eder. NLP alt problemleri, her (önemli) iterasyonda MILP ana problemi tarafından tahmin edilen sabit 0-1 değişkenleri için çözülür. Konveks problemler için ana problem ayrıca amaç fonksiyonu için bir alt sınır sağlar. Bu alt sınır (en aza indirme durumunda) doğrusal yaklaşımların birikimi nedeniyle iterasyonlar ilerledikçe monoton olarak artar. En çoklama durumunda bu sınır bir üst sınır olup, DICOPT'un bir seçeneği olan durdurma aracılığıyla bir durdurma kriteri olarak kullanılabilir. Konveks olmayan problemler için (ve hatta konveks problemler için bile) oldukça iyi çalışan başka bir durdurma kriteri, sezgisele dayalıdır: NLP alt problemleri kötüleşmeye başladığında durur (Yani, mevcut NLP alt probleminin optimal amaç fonksiyonu önceki NLP alt problemden daha kötü ise). Bu durdurma kriteri, artırılmış ceza kullanımına dayanır ve aşağıdaki algoritmanın açıklamasında kullanılır. Bu ayrıca DICOPT'un uygulamasındaki varsayılan durdurma kriteridir. Algoritma kısaca Şekil 2.1 deki gibi ifade edilebilir:



Şekil 2.1: DICOPT algoritması akış diyagramı

2.2. Eskişehir İçin Tıbbi Atık Tersine Lojistik Süreçleri

Bu bölümde Eskişehir'deki mevcut tıbbi atık süreçleri incelenecek ve mevcut durum, önerilen durum ile karşılaştırılacaktır. Ayrıca, kurulan modelin temel varsayımları, matematiksel yapısı ve GAMS üzerindeki uygulanması ile ilgili ayrıntılar açıklanacaktır.

2.2.1 Mevcut Durum Özeti

Eskişehir içerisinde Odunpazarı ve Tepebaşı bölgelerindeki tıbbi atık sterilizasyon ve bertaraf süreci Vertisa Tıbbi Atık Sterilizasyon Firması tarafından yürütülmektedir ve Eskişehir Büyükşehir Belediyesi'ne taşeron olarak hizmet vermektedir. Eskişehir' de bulunan sterilizasyon tesisinin günlük kapasitesi 12 ton olarak bildirilmiştir. Matematiksel model yıllık olarak yapıldığından yıllık kapasite 4320 ton olarak hesaplanmıştır. Firmanın çalıştırdığı 3 adet araç mevcuttur. Bu araçlar ile Eskişehir içerisindeki tıbbi atık üreticilerinden tıbbi atıklar toplanıp sterilizasyon tesisine taşınmaktadır. Araçların her birinin kapasitesinin ortalama 3 ton olduğu bilgisi taşeron firmadan alınmıştır.

Tıbbi atık artış miktarının 2020' ye kadar yıllık %5 ve Covid-19 zamanında %10 olduğu bilgisi taşeron firmadan alınmıştır. Patolojik atıklar ise taşeron firmanın belirttiğine göre sadece belirli hastanelerden (Eskişehir Şehir Hastanesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sağlık Uygulama ve Araştırma Hastanesi, Özel Acıbadem Eskişehir Hastanesi, Eskişehir Yunus Emre Devlet Hastanesi) çıkmaktadır. Matematiksel model de bu şekilde oluşturulmuştur. Sterilizasyon tesisi dışında bir transfer tesisi bulunmamaktadır ve toplanan tıbbi atıklar direkt olarak sterilizasyon tesisine taşınmaktadır. Tıbbi Atık Yönetmeliği'ne göre KDB (Kesici - Delici, Bulaşıcı) türü tıbbi atıkların toplam bekletilme süresi 1 haftadan uzun olamaz. Patolojik atıklar ise maksimum 6 ay kadar bekletilebilmektedir. Güncel durumda tıbbi atık üreticileri (Hastaneler) patolojik atıkları 4 ay kadar bekletmekte sonrasında taşeron sterilizasyon firması bu atıkları toplamaktadır. Sterilizasyon tesisinde de 1 ay bekletilen patolojik atıklar sonrasında Ankara'daki bertaraf tesisine gönderilmektedir.

Araçlar güncel durumda gün içerisinde 3 defa tura çıkmaktadırlar ve birinci tur büyük hastanelere, ikinci tur küçük hastanelere ve son turda hastane dışındaki tıbbi atık üreticilerine (laboratuvarlar, sağlık tesisleri vs.) giderek tıbbi atıkları toplamaktadırlar.

Matematiksel modelde bu kısımda tek aracın hareketi baz alınmıştır, yani sadece büyük hastaneler göz önünde bulundurulmuştur ve araç hareketlerinin detayı çalışma kapsamında bırakılmıştır. Bunun sebebi hali hazırdaki karmaşık ağ yapısına bir de yol problemi ekleyerek problemi daha kompleks hale getirmemektir.

Özet olarak tıbbi atık verileri güncel durumdan alınmıştır. Fakat yol ve lojistik gibi durumlar basitleştirilerek matematiksel modele eklenmiştir.

2.2.2. Mevcut Durum ve Önerilen Durum Karşılaştırılması

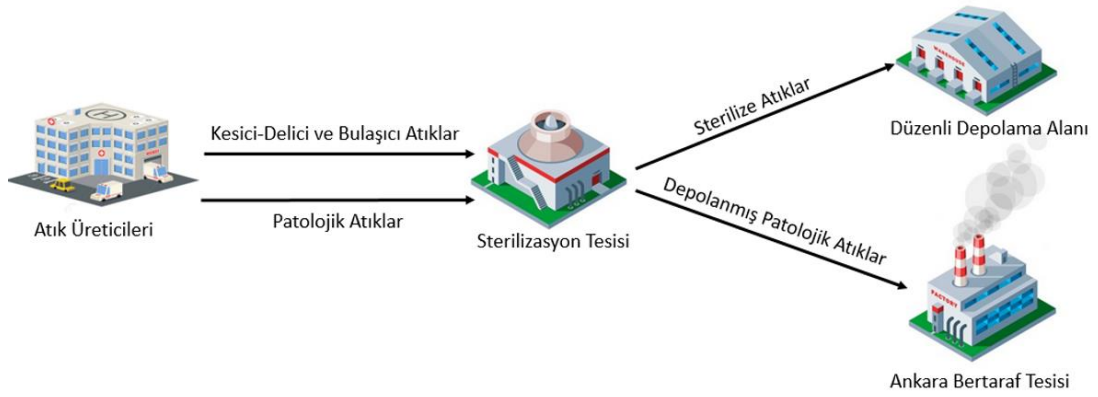
Çalışmanın bu kısmında Eskişehir’de Odunpazarı ve Tepebaşı bölgesindeki tıbbi atık tersine lojistik süreçlerinin 2023 yılı içindeki mevcut durumu izah edilecektir. Tıbbi atıklar daha önce izah edildiği üzere iki grup altında incelenmiştir. 1. grup tıbbi atıklar KDB tıbbi atıklardır. 2. grup tıbbi atıklar ise patolojik atıklardır.

Tıbbi atık üreticileri seçimi Odunpazarı ve Tepebaşı ilçelerinden en çok tıbbi atık üreten kurumlardan yapılmıştır. Tablo 2.2’ de seçilen tıbbi atık üreticileri listesi görülmektedir.

Tablo 2.2: Odunpazarı ve Tepebaşı’nda seçilen tıbbi atık üreticileri listesi

No	Semt	Atık Üreticileri (Hastaneler)
1	Odunpazarı	Eskişehir Şehir Hastanesi
2	Odunpazarı	Özel Ümit Vişnelik Hastanesi
3	Odunpazarı	Özel Eskişehir Anadolu Hastanesi
4	Odunpazarı	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sağlık Uygulama ve Araştırma Hastanesi
5	Odunpazarı	Eskişehir Yunus Emre Devlet Hastanesi 2 Eylül Hizmet Binası
6	Tepebaşı	Özel Ümit Hastanesi
7	Tepebaşı	Özel Gürlife Hastanesi
8	Tepebaşı	Özel Acıbadem Eskişehir Hastanesi
9	Tepebaşı	Eskişehir Yunus Emre Devlet Hastanesi
10	Odunpazarı	Sterilizasyon Tesisi
11	Ankara	Bertaraf Tesisi
12	Odunpazarı	Yakma Tesisi (Önerilen)
13	Odunpazarı	Düzenli Depolama Sahası

KDB atıkların ve patolojik atıkların miktarı taşeron firmadan gelen verilere göre uygulanmıştır. Genel olarak patolojik atıklar tüm atıklarının %1’i miktarındadır. Modelleme kısmında kolaylık olması açısından KDB ve Patolojik atıklar ayrı değişkenler olarak modellenmiştir. Bu sayede farklı atık tiplerinin maliyete etkisi detaylıca hesaplanabilmektedir. Bu kısımların detayları ileriki bölümlerde açıklanacaktır. Şekil 2.2’ de mevcut durumun şematiği gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Odunpazarı ve Tepebaşı 2023 mevcut tıbbi atık tersine lojistik süreci

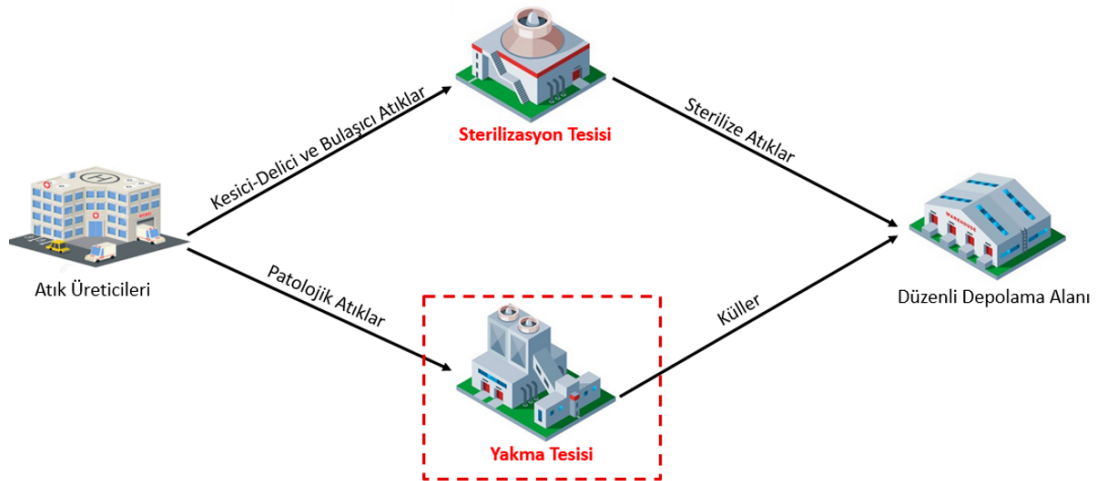
Tıbbi atıklar, taşeron sterilizasyon firması tarafından taşınmaktadır ve süreçler bu firma tarafından organize edilmektedir. Bütün tıbbi atık üreticilerinden tıbbi atıklar bu kuruma ait 1 adet araç tarafından alınmaktadır. Daha sonrasında toplanan bu atıklar Odunpazarı bölgesindeki sterilizasyon tesisine taşınmaktadır. Şekil 2.3.' de ilgili atık üreticilerin, tesislerin ve düzenli depolama sahasının ve Ankara bertaraf tesisinin haritadaki konumları gösterilmektedir. Sterilizasyon tesisinin de bir kapasitesi mevcuttur. Kapasite miktarı ilgili taşeron firmadan alınmıştır ve modele eklenmiştir. Sterilizasyon tesisinde sterilize olan KDB atıklar düzenli depolama sahasına taşınarak gömülmektedir. Ayrıca sterilizasyon tesisinde depolanan patolojik tıbbi atıklar da yine aynı taşeron firma tarafından Ankara'ya taşınmaktadır.

No	Semt	Atık Üreticileri (Hastaneler)
1	Odunpazarı	Eskişehir Şehir Hastanesi
2	Odunpazarı	Özel Ümit Vişnelik Hastanesi
3	Odunpazarı	Özel Eskişehir Anadolu Hastanesi
4	Odunpazarı	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sağlık Uygulama ve Araştırma Hastanesi
5	Odunpazarı	Eskişehir Yunus Emre Devlet Hastanesi 2 Eylül Hizmet Binası
6	Tepebaşı	Özel Ümit Hastanesi
7	Tepebaşı	Özel Gürlife Hastanesi
8	Tepebaşı	Özel Acibadem Eskişehir Hastanesi
9	Tepebaşı	Eskişehir Yunus Emre Devlet Hastanesi
10	Odunpazarı	Sterilizasyon Tesisi
11	Ankara	Bertaraf Tesisi
12	Odunpazarı	Yakma Tesisi (Önerilen)
13	Odunpazarı	Düzenli Depolama Sahası



Şekil 2.3: Atık üreticilerin, tesislerin, depolama sahasının ve Ankara'nın konumu

Mevcut durumdaki sistemde yakma işlemleri Ankara’ da yapıldığından ortaya çıkan emisyon miktarı açısından Eskişehir için avantajlı bir durum vardır. Fakat Ankara’da yapılan yakma işlemleri içinde Ankara Bertaraf Tesisine belirli bir miktar ücret ödenmektedir. Dolayısı ile tıbbi atık süreçleri hem emisyon hem de maliyet açısından ele alındığı zaman bu süreçlerin Eskişehir içinde icra edilmesinin faydalı olup olmayacağının araştırılması için bu çalışma içerisinde yeni bir sistem önerilmektedir. Bu sistem içerisinde Eskişehir içerisinde bir yakma tesisinin stratejik olarak kurulması ve patolojik tıbbi atık bertaraf süreçlerinin de Eskişehir içine taşınması konuları irdelenmiştir. Şekil 2.4’ te önerilen tersine lojistik ağı şematik olarak belirtilmiştir. Eskişehir içerisinde icra edilecek yakma işlemlerinden ortaya çıkabilecek muhtemel tasarruflar emisyon miktarlarının azaltması için yatırım olabilir ve Eskişehir Büyükşehir Belediyesi’nin diğer hizmetleri için de kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında bu iki durumunda mali tabloları sayısal bir zemine oturtulmaya çalışılmıştır.



Şekil 2.4: Odunpazarı ve Tepebaşı için önerilen tıbbi atık tersine lojistik modeli

Şekil 2.4’de görüleceği üzere önerilen modelde patolojik atıklar tıbbi atık üreticilerinden toplandıktan sonra yakma tesisine taşınmakta ve yakma işlemi burada icra edilmektedir. Mevcut versiyonda sterilizasyon tesisinden alınan patolojik atıklar Ankara’ya taşınırken, önerilen modelde kurulacak olan Eskişehir yakma tesisinde yakıldıktan sonra ortaya çıkacak küller depolama tesisine gömülmek üzere taşınacaktır. Önerilen modelde yakılan patolojik atıkların kütlesinde belirli bir azalma kabulü ile modelleme yapılmıştır. Genel anlamda iki model de dikkatli incelendiği zaman önerilen durumda emisyon miktarlarında artış, maliyet miktarlarında düşüş

beklenmektedir. Bunun temel sebeplerinden bir tanesi taşıma maliyetlerinin Eskişehir içerisinde daha kısa yollardan dolayı daha az olacak olmasıdır. Emisyondan gelecek maliyetler ise ilerideki kısımlarda irdelenecektir.

Yakma tesisinin yerine karar verilirken mevcut yol durumu göz önünde bulundurulmuştur. Maliyetin büyük bir kısmı toplama maliyeti olacağı öngörülerek, önerilen model için yakma tesisi Eskişehir’de bulunan sterilizasyon tesisinin çok yakınına konumlandırılmıştır. Sterilizasyon firması çalışanları ilgili bölgede yakma tesisi kurulması için yeterli bir alanın olduğunu teyit etmiştir. Yakma tesisinin aynı bölgede olması ile ekstra araç ihtiyacının da önüne geçileceği düşünülmüştür.

2.2.3. Modelin Genel Varsayımları

Matematiksel model kurulmadan önce bazı ön kabuller ve varsayımlar yapılmıştır. Bu varsayımlar yapılırken problemin gerçek verilerden uzaklaşmaması ve detaylarını fazla kaybetmeden çıkarım yapılabilecek şekilde problem düzenlemesi önemlidir. Varsayımlar yapılmadan önce bu varsayımların problemi matematiksel olarak nasıl etkileyeceği üzerine düşünülmelidir. Bu kısımda model içinde yapılan varsayımlar ve kabuller izah edilecektir. Bu varsayımlar hem maliyet anlamında hem de emisyon anlamında etkilere sebebiyet verecektir. Genel anlamda model kurulumu öncesi yapılan majör varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- Sterilizasyon tesisinin ve Eskişehir’deki yakma tesisi açılacaksa kapasitesi sınırlı ve sabittir.
- 1. sterilizasyon tesisi modelde hep açıktır. Gerekğinde 2. sterilizasyon tesisi açılacaktır. 1. sterilizasyon tesisinin hep açık olduğu “Kısıtlar” bölümü K11 de formülasyonla da ifade edilmiştir. Ayrıca, 1. sterilizasyon tesisi hep açık olduğu için eklenecek sabit kurulum maliyeti bulunmamaktadır. Bu yüzden “Amaç Fonksiyonları” bölümü A1 de formülasyona eklenmemiştir.
- Ankara bertaraf tesisinin ve düzenli depolama sahasının kapasitelerinin sınırsız olduğu varsayılmaktadır.
- Bertaraf işlemi Ankara yerine Eskişehir’ de yapılacaksa, yakma tesisi mevcuttaki sterilizasyon tesisinin yanına kurulacağı varsayılmıştır.

- Ankara bertaraf tesisi 1 adettir ve bertaraf işlemi Ankara yerine Eskişehir’ de yapılacaksa Eskişehir’de açılacak yakma tesisinin 1 adet olduğu varsayılmıştır. Ya Ankara bertaraf tesisi ya da Eskişehir’deki yakma tesisi açık olacaktır. Tesislerin açık / kapalı olma durumu “Kısıtlar” bölümü K11 de formülasyonla da ifade edilmiştir.
- Kapasite yetersizliği durumunda yeni açılacak sterilizasyon tesisinin mevcuttaki sterilizasyon tesisinin yanına kurulacağı varsayılmıştır.
- Tıbbi atıkların her bir tesise taşınması sırasında CO₂(e) emisyonlarının oluştuğu kabul edilmektedir.
- Ulaşımdan kaynaklanan CO₂(e) emisyonu, katedilen mesafeye ve taşınan tıbbi atık miktarına bağlıdır.
- Yakma, sterilizasyon, taşıma işlemleri ve tesis kurulumları dışında diğer işlemlerden kaynaklanan karbon emisyonu amaç fonksiyonunda göz ardı edilmiştir.
- Ankara bertaraf birim maliyeti, yakma birim maliyetinin 2 katı olarak kabul edilmiştir.
- Patolojik atıkların sterilizasyon tesisinde depolanması maliyeti toplam maliyetin %5’i olarak kabul edilmiştir.
- Taşıma işlemlerinin tek yönlü olduğu kabulü yapılmıştır.
- Taşıma işlemlerinin sıra ile yapıldığı varsayılmıştır. Araçların geçmesi gereken ara yollar hesaba katılmamıştır.

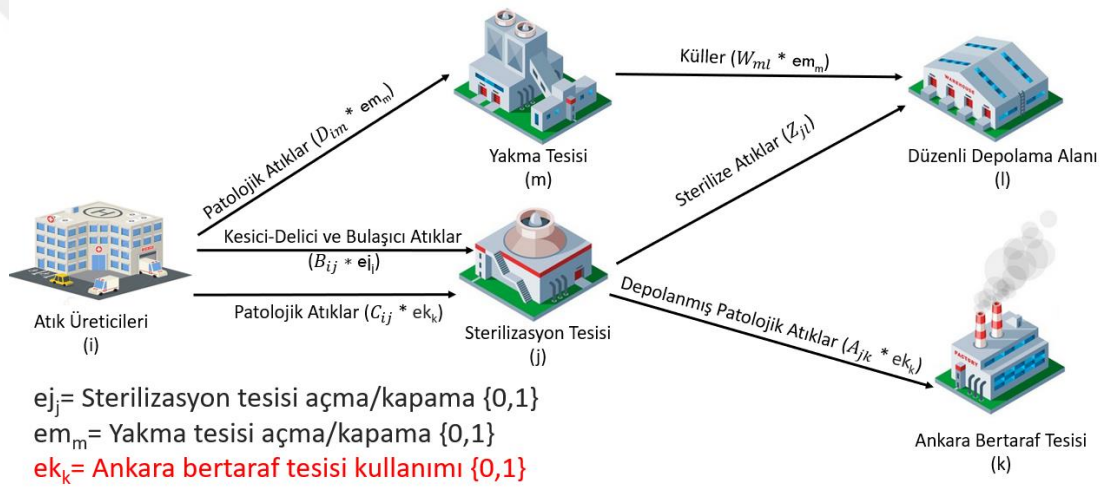
Yapılan bu kabuller sonucunda matematiksel model şekillenmiştir.

2.2.4. Matematiksel Model ve Modelin Kurulumu

Senaryolar nümerik olarak oluşturulmadan önce mevcut ve önerilen senaryoların matematiksel denklemleri oluşturulmuştur ve doğrusal programlama modeli elde edilmiştir. Matematiksel model iki adet amaç fonksiyonu ve çeşitli kısıt fonksiyonları içermektedir. Amaç fonksiyonlarının çözümü için ağırlıklı toplam metodu kullanılmıştır. Bu modelde bir sonraki kısımda detaylı olarak bahsedilecektir. Bütün çözümler GAMS programı ile çözülmüştür. Matematiksel model bir kere

oluşturulduktan sonra bütün farklı senaryolar ilgili model üzerinde basit değişiklikler yapılarak denenmiştir.

Modelleme öncesinde ilk olarak karar değişkenleri ve sürekli değişkenler net bir şekilde gruplanmış ve tıbbi atıkların ağ modeli içindeki bütün hareketleri ayrı ayrı isimlendirilmiştir. Aynı zamanda çalışma öncesinde 2 farklı modeli ayrı ayrı çözüp karşılaştırmaktansa tek bir birleştirilmiş model ile çalışarak ilerlemek daha uygun görülmüştür. Bu durum oluşturulan modelin kısıtlarında ve amaç fonksiyonlarında bazı modifikasyonlar gerektirmiştir. Bu modifikasyonlar ikili tamsayı değişkenler ile sağlanmıştır. Şekil 2.5’ te modifiye edilen birleştirilmiş temsili model bulunmaktadır.



Şekil 2.5: Birleştirilmiş model şematığı

Bu karar değişkenleri sayesinde problemin iki durum arasında karar vermeye zorlanması sağlanmıştır. İlgili tercih kısıtlamaları ile Ankara opsiyonu seçildiğinde Eskişehir seçeneğinden gelen bütün işlemler ve mali yükler sıfır olacak şekilde düzenleme yapılmıştır. Bu kısıtlar matematiksel denklemlerin tanıtımında izah edilecektir. Problem sırasında çözüm verilen önem ağırlık katsayılarına göre hesaplanmıştır ve Eskişehir ya da Ankara seçeneklerinden hangisinin optimum olduğuna karar verilmiştir. Deneme analizleri pek çok farklı senaryo için yapılmıştır ve bu senaryolar ilerideki kısımlarda izah edilip özetlenecektir.

Şekil 2.5’ te görüleceği üzere tam sayılı ikili değişkenler yardımı ile matematiksel model kurgulanmıştır. Bu değişkenler çözüm sırasında {0,1} değerlerini almaktadır.

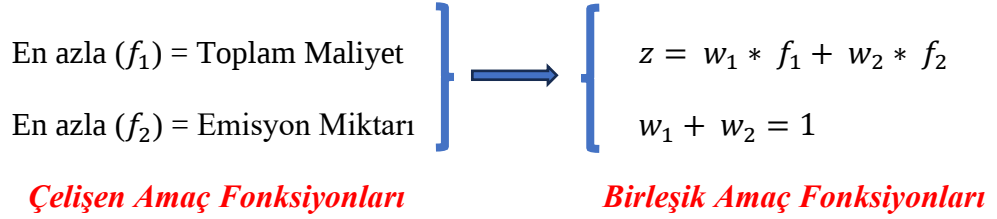
Görüleceği üzere Eskişehir modelinin tercih edilmesi için model sonucunda em_m değerinin 1 olması gerekmektedir. Bu sayede Ankara seçeneği ile ilgili bütün değişkenler 0 olacaktır ($ek_k=0$ olacağı için). Model sırasında bu değişkenler takip edilerek fiziksel bir sonuç elde edilip edilmediği yorumlanabilmektedir. Benzer bir yöntem de yeni bir sterilizasyon tesisi ihtiyacı durumu için kurgulanmıştır. Eğer çözölen senaryo içerisindeki toplam tıbbi atık miktarı kapasiteden fazla ise yeni bir sterilizasyon tesisi açılacaktır. Buradaki tıbbi atık dağılımı da çözüm sırasında program tarafından kararlaştırılmaktadır.

2.2.5. Ağırlıklı Toplam Metodu ve Amaç Fonksiyonu Oluşturulması

Çalışmada 2 adet amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Bu amaç fonksiyonlarından birincisi taşıma, toplama ve bertaraf süreçlerinden gelen maliyet en azlanması, diğeri ise bu süreçler sırasında ortaya çıkan emisyon salınımı miktarının en azlanmasıdır. Birden fazla amaç fonksiyonunun olduğı problemlerde bu amaç fonksiyonların sonuca olan etkisini bu fonksiyonların *matematiksel* önemi belirler. Literatüre çok amaçlı optimizasyon problemleri olarak geçen bu problemleri çözmek için çeşitli metodlar mevcuttur. Bu çalışma kapsamında “Ağırlıklı Toplam Metodu” seçilmiştir. Çalışmanın bu kısmında ağırlıklı toplam metodu izah edilecektir. Sonrasında ise çözülmeye çalışılan probleme uygulanışı açıklanacaktır.

Çok amaçlı optimizasyonda yaygın bir kavram olan ağırlıklı toplamın en azlanması hem bağımsız bir metod olarak hem de diğeri metodların bir parçası olarak kullanılır. Bu nedenle, ağırlıklı toplam metodunun özelliklerine dair sağlanan içgörüler, derin etkilere sahiptir. Ağırlıkları belirleme, amaçların önemini yansıtmanın sadece bir yoludur ve birçok farklı metoda uygulanabilir. Dolayısıyla, ağırlıkların çözüm üzerindeki etkilerini anlamak, benzer metod parametreleri içeren diğeri yaklaşımları ilgilendiren sonuçlar doğurur. Fakat bu çalışma kapsamında ağırlık önem belirlenmesi için bir metodoloji belirlenmemiştir. Literatürde Balcı vd., (2022), neredeyse tüm ağırlıkları deneyerek duyarlılık analizleri yapmıştır. Bunun yanı sıra Wang vd., (2019), maliyet ve emisyon salınımı fonksiyonları için uygun ağırlıkların belirlenmesi konusunda 10 uzman görüşüne başvurmuşlardır. Bu danışmanlık sürecinde, uzmanların önerilerini toplayarak bu ağırlıkların ortalamasını hesaplamışlar ve ardından bu ortalamaları fonksiyonlarında kullanmışlardır.

Çalışma kapsamı daha çok mevcut durum ve önerilen durumun hangi önem ağırlıklarında yapılan karşılaştırmalarını sayısal bir zemine koymaktadır. Dolayısı ile çalışma kapsamında ağırlıklar eşit önem ile başlamış ve senaryolardan elde edilen sonuçlara göre değiştirilerek sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Daha ilerideki çalışmalarda, daha fazla gerçek veri ve uzman görüşleri ile bu ağırlıkların atanması için farklı yöntemler izlenebilir.



Şekil 2.6: Farklı amaç fonksiyonlarının birleştirilmesi

Marler ve Arora (2009)'a göre ağırlıklı toplam metodu ile farklı amaç fonksiyonları bir araya getirilerek tek bir amaç fonksiyonuna indirgenebilir. Şekil 2.6'te birleştirilen fonksiyonlar gösterilmektedir.

Modelin oluşturulmasını Marler ve Arora (2009)'nın örneği ile açıklayabiliriz. Elimizde çok amaçlı doğrusal olmayan programlama problemi olsun:

$$\text{En azla } Z_1 = 20(x_1 - 0.75)^2 + (2x_2 - 2)^2 \quad (2.17)$$

$$\text{En azla } Z_2 = (x_1 - 2.5)^2 + (x_2 - 1.5)^2 \quad (2.18)$$

Kısıtlar olarak da sadece pozitiflik şartı olduğunu düşünelim:

$$x_1, x_2 \geq 0 \quad (2.19)$$

Bu problemin herhangi bir çok amaçlı optimizasyon çözüm yöntemi ile çözüldüğünü düşünelim. Örneğin problemi sadece Z_1 için çözdüğümüzde elde edilen optimal x_1 ve x_2 değerleri ile Z_1 ve Z_2 için aşağıdaki değerler elde edilir:

$$x_1^* = 0,75 \quad (2.20)$$

$$x_2^* = 1 \quad (2.21)$$

$$Z_1(x_1^*, x_2^*) = 0 \quad (2.22)$$

$$Z_2(x_1^*, x_2^*) = 3,3125 \quad (2.23)$$

Daha sonrasında problemin sadece Z_2 amacı için çözüldüğünü düşünelim. Bu amaç fonksiyonu için elde edilen x_1 ve x_2 değerleri ile Z_1 ve Z_2 aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$x_1^{**} = 2,5 \quad (2.24)$$

$$x_2^{**} = 1,5 \quad (2.25)$$

$$Z_1(x_1^{**}, x_2^{**}) = 62,25 \quad (2.26)$$

$$Z_2(x_1^{**}, x_2^{**}) = 0 \quad (2.27)$$

Bu sonuçlara bir ön inceleme yaptığımızda Z_1 ve Z_2 değerlerinin arasında büyüklük mertebesi olarak 20 kat fark bulunmaktadır. Bu bilgi ile birlikte bu problem eşit önem ağırlıkları ile çözelim. Bu minvalde birleştirilmiş denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Z = 0,5 * Z_1 + 0,5 * Z_2 \quad (2.28)$$

Denklem çözüldüğü zaman aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

$$x_1^{**} = 0,833 \quad (2.29)$$

$$x_2^{**} = 1,1 \quad (2.30)$$

$$Z(x_1^{***}, x_2^{***}) \Rightarrow Z_1 = 0,179, Z_2 = 2,938 \quad (2.31)$$

Bu sonuçları dikkatli olarak incelediğimiz zaman Z_1 değerinin 0 ile 62,25 arasında, Z_2 değerinin ise 0 ile 3,3125 arasında değiştiği görülmektedir. Kombine denklem çözüldüğünde gelen Z_1 ve Z_2 değerleri ise 0,179 ve 2,938 çıkmaktadır. Eğer ağırlıklar, Z_1 'in Z_2 'den iki kat daha önemli olduğunu önermek üzere ayarlanmışsa bile (yani $w_1 = 0,33$, $w_2 = 0,66$), o zaman çözüm $Z_1, Z_2 = (0,179, 2,938)$ olacaktır. Bir ağırlık diğerinden iki kat daha büyük olsa bile, çözüm önemli ölçüde değişmez. Burada Z_1 'in çok geniş bir aralıkta olmasına rağmen limitine çok yakın bir değer aldığı görülürken Z_2 ise maksimumuna yakın bir değer almaktadır. Bu durumun sebebi aslında Z_1 ve Z_2 değerlerinin farklı skalalarda olmasıdır. Bu değerlerin birbiri arasında karşılaştırılması için iki değeri de benzer değerlere getirecek mantıklı bir normalizasyon yöntemi kullanılabilir. Denklem (2.32)'yi bu minvalde Z_1 ve Z_2 'nin maksimum değerleri ile normalize edilebilir:

$$Z_{norm} = \frac{w_1 Z_1}{Z_{1,max}} + \frac{w_2 Z_2}{Z_{2,max}} \quad (2.32)$$

Amaç fonksiyonu bu şekilde modifiye edilip çözüldüğü zaman, eşit ağırlıklar için, Z_1 ve Z_2 değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$x_1^{***} = 1,598 \quad (2.33)$$

$$x_2^{***} = 1,412 \quad (2.34)$$

$$Z(x_1^{***}, x_2^{***}) \Rightarrow Z_1 = 15,054, Z_2 = 0,822 \quad (2.35)$$

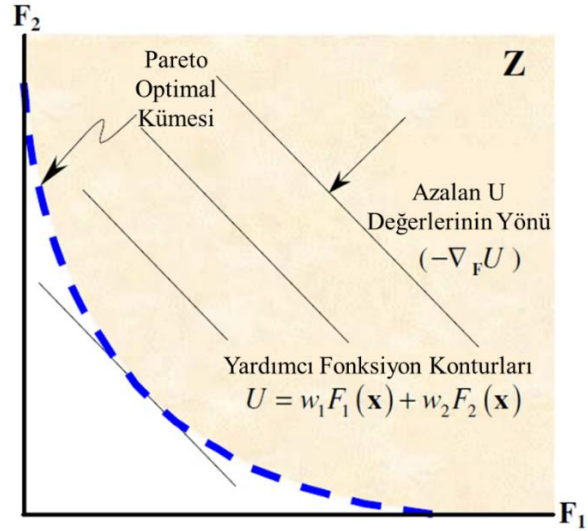
Buradan görüleceği üzere Z_1 ve Z_2 değerleri aralıkları içerisinde daha mantıklı değerler ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada da bu yöntem ile normalizasyon uygulanmıştır. Özetle, ağırlıklı toplam yönteminin temel eksikliği, ağırlıkların amaç fonksiyonlarının büyüklük farklarını telafi etmek için mi ayarlandığını yoksa puanlama yöntemleriyle olduğu gibi bir amacın göreceli önemini belirtmek için mi ayarlandığını ayırt etmenin zor olabileceğidir. Bu minvalde normalizasyon ile birlikte amaç fonksiyonlarını ve sınırlar genel anlamda aşağıdaki şekilde modellenebilir:

$$En\ azla\ f(x) = U = \frac{w_1 * f_1(x)}{f_1^*(x)} + \frac{w_2 * f_2(x)}{f_2^*(x)} \quad (2.36)$$

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (2.37)$$

$$0 \leq w_1, w_2 \leq 1 \quad (2.38)$$

Ağırlıklı toplam modelinin pareto-optimal temsili çözüm uzayı Şekil 2.7' de gösterilmektedir.



Şekil 2.7: Ağırlıklı toplam pareto-optimal çözüm uzayı (Marler ve Arora (2009))

2.2.6. GAMS'te Modelin Kurulumu

Kombine çok amaçlı optimizasyon probleminin oluşturulması bu kısımda izah edilecektir. Öncelikle problemin içerdiği tesislerin indisleri ile başlanacaktır. Daha sonrasında bütün değişkenler, sabitler ve katsayılar izah edilecektir. Devamında kısıtlar ve amaç fonksiyonları anlatılacaktır.

Kurulan model, ürün akışlarını, değişkenlerini, açık ve kapalı olma durumlarını, maliyet katkılarını, emisyon veya diğer etkilerin problem sonucuna etkisini doğru ve mantıklı şekilde temsil edip hesaplayacak şekilde kurulmalıdır. Ürünler (tıbbi atıklar) farklı tesisleri gezeceğinden dolayı ürün akışlarında devamlılık sağlanmalıdır. Aynı zamanda süreç içerisinde geçen bütün hareketlerin ve işlemleri maliyet ve emisyon katkısı da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu modelleme yöntemi ile tıbbi atık döngüsü veya benzer nitelik tersine lojistik problemlerin çözümü için alternatif yollar araştırılabilir ve matematiksel olarak farklı yöntemlerin ve değişkenlerin etkileri karşılaştırılabilir.

2.2.6.1. İndisler

$$i: \text{Tıbbi atık üreticileri} \quad i: 1, 2, 3, \dots, I \quad (2.39)$$

$$j: \text{Sterilizasyon tesisi} \quad j: 1, 2, 3, \dots, J \quad (2.40)$$

$$k: \text{Ankara bertaraf tesisi} \quad k: 1, 2, 3, \dots, K \quad (2.41)$$

$$l: \text{Düzenli depolama sahası} \quad l: 1, 2, 3, \dots, L \quad (2.42)$$

$$m: \text{Yakma tesisi} \quad m: 1, 2, 3, \dots, M \quad (2.43)$$

Modeldeki tesislerin ve değişken hareketlerinin hepsi indisler ile ifade edilmektedir. Örneğin 9 adet tıbbi atık üreticisinin her biri i indisi ile temsil edilmektedir. Ayrıca varsayımlarda bahsedildiği gibi Ankara bertaraf tesisinin ve duruma göre onun yerine Eskişehir’de açılacak yakma tesisinin 1’er adet olduğu varsayılmıştır. ($k=1$, $m=1$) İndislerdeki ve parametrelerdeki genel gösterim, genel bir model oluşturmak ve ihtiyaç duyulduğunda modelin kolayca genişletilebilmesini sağlamak amacıyla yapılmıştır.

2.2.6.2. Parametreler

Parametre tanımlarına atık miktarları ile başlanmıştır. KDB tıbbi atıkları ve patolojik atıklar aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

Tıbbi Atık Miktarı	
Qs_i	Atık üreticileri (i) tarafından üretilen KDB tıbbi atık miktarı (ton)
Qp_i	Atık üreticileri (i) tarafından üretilen patolojik tıbbi atık miktarı (ton)

Maliyet hesaplamaları için kullanılan parametreler ise aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

Sabit Açılış Maliyeti	
fs_j	Sterilizasyon tesisinin (j) sabit açılış maliyeti (€)
fy_m	Yakma tesisinin (i) sabit açılış maliyeti (€)

Tıbbi Atık Toplama Maliyeti	
ccs_j	Ton başına tüm atıklarının sterilizasyon tesisine toplama maliyeti (€/ton)
cca_k	Ton başına patolojik atıklarının Ankara bertaraf tesisine toplama maliyeti (€/ton)
ccy_m	Ton başına patolojik atıklarını yakma tesisine toplama maliyeti (€/ton)

İşlem Maliyeti	
sc_j	Sterilizasyon tesisindeki (j) sterilizasyon birim maliyeti (€/ton)
yc_m	Yakma tesisindeki (m) yakma birim maliyeti (€/ton)
lc_l	Düzenli depolama sahasındaki (l) bertarafın birim maliyeti (€/ton)
ac_k	Ankara bertaraf tesisindeki (k) yakma ve bertarafın birim maliyeti (€/ton)

Taşıma Maliyeti	
ts_{ij}	Tıbbi atık üreticilerinden (i) sterilizasyon tesisine (j) KDB atıkları taşımanın birim maliyeti ((€/km)/ton)
ta_{jk}	Sterilizasyon tesisinden (j) Ankara bertaraf tesisine (k) patolojik atık taşımanın birim maliyeti ((€/km)/ton)
tl_{jl}	Sterilizasyon tesisinden (j) düzenli depolama sahasına(l) sterilize atık taşımanın birim maliyeti ((€/km)/ton)
ty_{im}	Atık üreticilerinden (i) yanma tesisine (m) patolojik atıkları taşımanın birim maliyeti ((€/km)/ton)
tl_{ml}	Yanma tesisinden (m) düzenli depolama sahasına (l) külleri taşımanın birim maliyeti ((€/km)/ton)

Maliyet değişkenleri tanımlandıktan sonra programa yol bilgileri tanımlanmıştır. Yol bilgileri tesisler arası uzaklığı temsil etmektedir:

Taşıma Uzaklığı	
dhs_{ij}	Tıbbi atık üreticileri (i) sterilizasyon tesisi (j) arası uzaklık (km)
dsl_{jl}	Sterilizasyon tesisi (j) düzenli depolama sahası (l) arası uzaklık (km)
dsa_{jk}	Sterilizasyon tesisi (j) Ankara bertaraf tesisi (k) arası uzaklık (km)
dhy_{im}	Tıbbi atık üreticileri (i) yanma tesisi (m) arası uzaklık (km)
dyl_{ml}	Yanma tesisi (m) düzenli depolama sahası (l) arası uzaklık (km)

İkinci amaç fonksiyonu için gerekli karbon emisyon ile ilgili parametreler aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

Karbon Emisyon	
c_{tt}	Birim tıbbi atık taşınmasında ve toplanmasında ortaya çıkan ortalama $CO_2(e)$ emisyon faktörü ((kg * CO_2)/(ton*km))
c_{st}	Birim KDB atık sterilizasyonu sırasında ortaya çıkan ortalama $CO_2(e)$ emisyon faktörü ((kg * CO_2)/(ton))
c_{ya}	Birim patolojik atık yakılması sırasında ortaya çıkan ortalama $CO_2(e)$ emisyon faktörü ((kg * CO_2)/(ton))
cop	Her tondaki karbon emisyon maliyeti (€/ton)
f_{jco}	Sterilizasyon tesisi (j) açılırsa ortaya çıkacak $CO_2(e)$ miktarı
f_{mco}	Yakma tesisi (m) açılırsa ortaya çıkacak $CO_2(e)$ miktarı

Tesislerin kapasitesi aşağıdaki şekilde temsil edilmiştir:

Tesis Kapasiteleri	
$caps_j$	Sterilizasyon tesisinin (j) kapasitesi (ton)
$capy_m$	Yakma tesisinin (m) kapasitesi (ton)
$capl_l$	Düzenli depolama sahasının (l) kapasitesi (ton)
$capa_k$	Ankara bertaraf tesisinin (k) kapasitesi (ton)

Son olarak modele aşağıdaki parametreler eklenmiştir:

Diğer Parametreler	
a_1	Sterilize atıkların küçülme oranı
a_2	Yakılan atıkların küçülme oranı
w_1	Maliyet minimizasyonu için ağırlık
w_2	$CO_2(e)$ salınımı minimizasyonu için ağırlık ($1-w_1$)

Balcı vd., (2022)'ye göre sterilizasyon ve yakma işlemlerinden sonra KDB tıbbi atıklar ve patolojik atıklar hacimsel olarak % 75 küçülmektedir. Bu parametreler süreklilik kısıtlarında kullanılmıştır.

Ayrıca karar değişkenleri de aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

Karar Değişkenleri	
B_{ij}	Tıbbi atık üreticilerinden (i) sterilizasyon tesisine (j) gönderilen KDB tıbbi atıklar
C_{ij}	Tıbbi atık üreticilerinden (i) sterilizasyon tesisine (j) gönderilen patolojik atıklar
Z_{jl}	Sterilizasyon tesisinden (j) düzenli depolama sahasına (l) gönderilen sterilize atıklar
A_{jk}	Sterilizasyon tesisinden (j) Ankara bertaraf tesisine (k) gönderilen depolanmış patolojik atıklar
D_{im}	Tıbbi atık üreticilerinden (i) yakma tesisine (m) gönderilen patolojik atıklar
W_{ml}	Yakma tesisinden (m) düzenli depolama sahasına (l) gönderilen küller
ej_j	Sterilizasyon tesisinin (j) açık/kapalı olması durumu. (Açıkça 1, kapalıysa 0)
em_m	Yakma tesisinin (m) açık/kapalı olması durumu. (Açıkça 1, kapalıysa 0)
ek_k	Ankara bertaraf tesisinin (k) açık/kapalı olması durumu. (Açıkça 1, kapalıysa 0)

e_j , em_m , ek_k değişkenleri tesislerin açık veya kapalı olup olmadığını belirtmektedir. Problem sırasında ortaya çıkan maliyetlere göre yakma tesisinin durumu veya mevcut durumun devamlılığı bu parametreler ile takip edilmiştir. Sterilizasyon tesisleri için kullanılan e_j parametresi ise sterilizasyon tesisinin kapasitesi aşıldığında ikinci bir sterilizasyon tesisinin açılmasını temsil etmektedir.

2.2.6.3. Kısıtlar

Modelleme kısmına süreklilik kısıtları tanımlanmıştır. Bu kısıtlar ile tesislere giren tıbbi atık miktarları ile çıkan tıbbi atık miktarları eşitlenmiştir.

K1. Sterilizasyon tesisine gelen patolojik atıkların miktarı + Yakma tesisine gelen patolojik atıklar = Tıbbi atık üreticileri tarafından üretilen patolojik atıkların miktarı

$$\sum_j C_{ij} * ek_k + \sum_m D_{im} * em_m = Qp_i \quad \forall_i \quad (2.44)$$

K2. Sterilizasyon tesisine gelen KDB atıkların miktarı = Tıbbi atık üreticileri tarafından üretilen KDB atıkların miktarı

$$\sum_j B_{ij} * e_j = Qs_i \quad \forall_i \quad (2.45)$$

K3. Sterilizasyon tesisinden gönderilen sterilize atıkların miktarı = Düzenli depolama sahasına gelen sterilize atıkların miktarı

$$\sum_l Z_{jl} = a_1 * \sum_i B_{ij} * e_j \quad \forall_j \quad (2.46)$$

K4. Sterilizasyon tesisinden gönderilen patolojik atıkların miktarı = Ankara bertaraf tesisine gelen atıkların miktarı

$$\sum_k A_{jk} = \sum_i C_{ij} * ek_k \quad \forall_j \quad (2.47)$$

K5. Yakma tesisinden gönderilen küllerin miktarı = Düzenli depolama sahasına gelen küllerin miktarı

$$\sum_l W_{ml} = a_2 * em_m * \sum_i D_{ij} \quad \forall_m \quad (2.48)$$

Görüleceği üzere K5 numaralı kısıtta yanma tesisinden çıkan küller a oranında yüzdesel olarak küçültülerek düzenli depolama sahasına taşınmaktadır. Süreklilik kısıtları tam olarak sağlanmalıdır ve bir üst – alt limit söz konusu değildir. K1 ve K2 kısıtları KDB tıbbi atıkları ve patolojik atıkların tıbbi atık üretim tesislerinden diğer tesislere dağılımını modellemektedir. Görüleceği üzere patolojik tıbbi atıkların destinasyonu ek_k ve em_m tam sayılı ikili değişkenlere göre belirlenmektedir.

İkincil olarak kapasite kısıtları belirlenip GAMS modeline uygulanmıştır:

K6. Sterilizasyon tesisine giden tüm tıbbi atıklar, sterilizasyon tesisinin kapasitesini aşamaz.

$$\sum_i C_{ij} * ek_k + \sum_i B_{ij} * ej_j \leq caps_j \quad \forall_j \quad (2.49)$$

K7. Ankara bertaraf tesisine giden patolojik atıklar, Ankara bertaraf tesisinin kapasitesini aşamaz.

$$\sum_j A_{jk} \leq capa_k * ek_k \quad \forall_k \quad (2.50)$$

K8. Yakma tesisine giden patolojik atıklar, yakma tesisinin kapasitesini aşamaz.

$$\sum_i D_{im} \leq capy_m * em_m \quad \forall_m \quad (2.51)$$

K9. Depolama tesisine giden sterilize atıklar + küller, depolama sahasının kapasitesini aşamaz.

$$\sum_j Z_{jl} + \sum_m W_{ml} * em_m \leq capl_l \quad \forall_l \quad (2.52)$$

Kapasite kısıtları bu problemde ilerideki yıllarda farklı tesislerin açılıp açılmamasını öngörmek için kullanılabilir. Problem bu minvalde kolayca değiştirilerek farklı kapasite durumlarının problemin çözümüne etkilerini incelemek için kullanılabilir.

Modelin devamında pozitiflik ve açık / kapalı olma durumu sınırları girilmiştir:

K10. Pozitiflik

$$B_{ij}, C_{ij}, Z_{jl}, A_{jk}, D_{im}, W_{ml} \geq 0 \quad \forall_{i,j,l,k,m} \quad (2.53)$$

K11. Açık / Kapalı Olma Durumu

$$ej_j, em_m, ek_k = \{0, 1\} \quad \forall_{j,m,k} \quad (2.54)$$

$$em_m + ek_k = 1 \quad \forall_{m,k} \quad (2.55)$$

$$ej_1 = 1 \quad (2.56)$$

2.2.6.4. Amaç Fonksiyonları

Kısıtlar kısmından sonra amaç fonksiyonları programa tanıtılmıştır. Amaç fonksiyonları daha açıklayıcı olması için kısımlara ayrılmış bir şekilde sıralanmıştır. İlk olarak maliyet amaç fonksiyonu belirlenmiştir.

1.Sabit Maliyet, Taşıma Maliyeti, Operasyon Maliyeti Minimizasyonu (Min Z₁)

A1. Sabit Kurulum Maliyeti

$$fs_2 * ej_2 + \sum_m fy_m * em_m +$$

A2. Tüm Atıkların Tüm Aşamalardaki Taşıma Maliyeti

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_j B_{ij} * t_{ij} * d_{ij} * ej_j + \sum_i \sum_j C_{ij} * t_{ij} * d_{ij} * ek_k + \sum_j \sum_l Z_{jl} * t_{jl} * d_{jl} + \\ & \sum_j \sum_k A_{jk} * t_{jk} * d_{jk} * ek_k + \sum_i \sum_m D_{im} * t_{im} * d_{im} * em_m + \\ & \sum_m \sum_l W_{ml} * t_{ml} * d_{ml} * em_m + \end{aligned}$$

A3. Tüm Atıkların Tüm Aşamalardaki Toplama Maliyeti

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_j B_{ij} * cc_j * ej_j + \sum_i \sum_j C_{ij} * cc_j * ek_k + \sum_i \sum_m D_{im} * cc_m * em_m + \\ & \sum_j \sum_k A_{jk} * cc_k * ek_k + \end{aligned}$$

A4. Sterilizasyon Maliyeti

$$\sum_i \sum_j B_{ij} * sc_j * ej_j +$$

A5. Ankara Bertaraf Maliyeti

$$\sum_j \sum_k A_{jk} * ac_k * ek_k +$$

A6. Yakma Maliyeti

$$\sum_i \sum_m D_{im} * dc_m * em_m +$$

A7. Düzenli Depolama Sahasına Gönderilenlerin Bertaraf Maliyeti

$$\sum_j \sum_l Z_{jl} * lc_l + \sum_m \sum_l W_{ml} * lc_l * em_m +$$

A8. Açılması Muhtemel Sterilizasyon ve Yakma Tesislerinin Açılmaları Durumundaki Karbon Emisyon Maliyeti

$$fjco * ej_2 * cop + \sum_m f_{mco} * em_m * cop +$$

A9. Atıkların Tüm Aşamalardaki Taşınmaları Sırasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyon Maliyeti

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_j B_{ij} * c_{tt} * d_{ij} * cop * ej_j + \sum_i \sum_j C_{ij} * c_{tt} * d_{ij} * cop * ek_k + \\ & \sum_i \sum_m D_{im} * c_{tt} * d_{im} * cop * em_m + \sum_j \sum_l Z_{jl} * c_{tt} * d_{jl} * cop + \sum_j \sum_k A_{jk} * c_{tt} * \\ & d_{jk} * cop * ek_k + \sum_m \sum_l W_{ml} * c_{tt} * d_{ml} * cop * em_m + \end{aligned}$$

A10. KDB Atıkların Sterilizasyonu Sırasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyon Maliyeti

$$\sum_i \sum_j B_{ij} * c_{st} * ej_j * cop +$$

A11. Patolojik Atıkların Yakılması Sırasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyon Maliyeti

$$\sum_i \sum_m D_{im} * c_{ya} * em_m * cop + \sum_j \sum_k A_{jk} * c_{ya} * ek_k * cop$$

A1 – A11 terimleri bir araya getirilerek 1. Amaç fonksiyonunun matematiksel model kurulmuştur. Görüleceği üzere süreç içerisindeki bütün majör maliyet kaynakları modele eklenmeye çalışılmıştır. Bazı terimler içerisinde ikili tam sayılı karar değişkenleri de eklenmiştir. Böylece farklı tesislerin seçilmesi ve seçilmemesi durumunda seçilmeyen tesislerin maliyetlerinin denkleme katılmaması amaçlanmıştır.

Ayrıca A1 sabit kurulum maliyetindeki formülün “ $fs_2 * ej_2$ ” şeklinde kullanılmasının nedeni, 1. sterilizasyon tesisinin sürekli olarak faal (açık) olduğu ve sterilizasyon tesisinin kapasitesinin uzun yıllar boyunca yeterli olması sebebiyle 3 veya daha fazla sterilizasyon tesisine ihtiyaç duyulmamasıdır. “ fs_2 ”, 2. sterilizasyon tesisinin sabit

kurulum maliyetini ve “ ej_2 ”, 2. sterilizasyon tesisinin açılıp açılmayacağı durumunu temsil etmektedir.

Benzer şekilde ortaya çıkan emisyon miktarının da ortaya koyduğu bir maliyet mevcuttur. Süreç içerisinde ciddi miktarda transport ve yanma olayı olduğundan bu maliyette probleme eklenmiştir. Devam eden kısımda ikinci amaç fonksiyonu olan emisyon minimizasyonu amacı mevcuttur.

2. Karbon Emisyon Salınımı Minimizasyonu (Min Z_2)

A12. Açılması Muhtemel Sterilizasyon ve Yakma Tesislerinin Açılmaları Durumundaki Karbon Emisyon Salınımı

$$fjco * ej_j + \sum_m f_{mco} * em_m$$

A13. Atıkların Tüm Aşamalardaki Taşınmaları Sırasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyon Salınımı

$$\sum_i \sum_j B_{ij} * c_{tt} * d_{ij} * ej_j + \sum_i \sum_j C_{ij} * c_{tt} * d_{ij} * ek_k + \sum_i \sum_m D_{im} * c_{tt} * d_{im} * em_m + \sum_j \sum_l Z_{jl} * c_{tt} * d_{jl} * + \sum_j \sum_k A_{jk} * c_{tt} * d_{jk} * ek_k + \sum_m \sum_l W_{ml} * c_{tt} * d_{ml} * em_m$$

A14. KDB Atıkların Sterilizasyonu Sırasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyon Miktarı

$$\sum_i \sum_j B_{ij} * c_{st} * ej_j$$

A15. Patolojik Atıkların Yakılması Sırasında Ortaya Çıkan Karbon Emisyon Miktarı

$$\sum_i \sum_m D_{im} * c_{ya} * em_m + \sum_j \sum_k A_{jk} * c_{ya} * ek_k$$

Ortaya çıkan karbon emisyon miktarları yeni tesislerin açılması, yakma işlemleri ve tıbbi atık taşıma işlemlerinden ortaya çıkmaktadır.

İki amaç fonksiyonu önceki kısımlarda belirtilen normalizasyon yöntemi ile bir araya getirilmiştir. Maliyet değeri Ankara seçeneği için hesaplanan maliyetle, emisyon değeri de Ankara için hesaplanan emisyon miktarı ile normalize edilip ağırlık oranları ile çarpılmıştır. Denklem (2.57)’te ilk kısmın 1.05 ile çarpılmasının nedeni varsayımlar

bölümünde de bahsedildiği üzere patolojik atıkların Ankara yakma tesisine gönderilmeden önce Eskişehir’de bulunan sterilizasyon tesisinde depolanmasından dolayıdır. Patolojik atıkların sterilizasyon tesisinde depolanması maliyeti toplam maliyetin %5’i olarak kabul edilmiştir. Bu yüzden de toplam maliyet 1,05 ile çarpılmıştır.

$$Z = \frac{w_1 F_1 * 1,05}{F_{1,Ankara}} + \frac{(1 - w_2) F_2}{F_{2,Ankara}} \quad (2.57)$$

Bu denklemler GAMS ortamına programlanmıştır ve MINLP çözücü ayarlarına uygun şekilde programa eklenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında tersine lojistik ağ tasarımı için kurulan model yapısı gereği doğrusal olarak görünmektedir. Ancak bir durumdan dolayı problem GAMS’te doğrusal olarak ele alınamamıştır.

Bu durum, amaç fonksiyonunun parçası olan A.15’te belirtilen em_m ve ek_k karar değişkenlerinin diğer D_{im} ve A_{jk} karar değişkenleri ile aynı formülasyonda çarpım halinde olmasıdır. Formüldeki em_m ve ek_k karar değişkenleri daha önce “Parametreler” başlığında belirtildiği üzere tesislerin açık/kapalı olması durumunu belirtmektedir. em_m karar değişkeni Eskişehir’deki yakma tesisini temsil etmektedir. Patolojik atık sayısı, maliyetler ve emisyon salınımı miktarındaki değişikliklere göre GAMS Eskişehir yakma tesisi açılışının optimal olduğu sonucuna varırsa $em_m=1$, $ek_k=0$ olacaktır; tam tersi durumda da $em_m=0$, $ek_k=1$ olacaktır. Benzer karar değişkenleri kısıtlarda ve diğer amaç fonksiyonu parçalarında da mevcuttur.

2.2.6.5. Verilerin Tayini

Bu kısımda modelde kullanılan veriler ve parametreler izah edilecektir. Bu verilerden bir kısmı taşıeron firmadan alınmıştır. Bir kısmı literatürden elde edilmiştir. Son grup ise atama ve tahmin ile kararlaştırılmıştır. Daha sonra bu gruptaki verilerin farklı senaryolar ile etkileri çalışılmıştır. Öncelikle tıbbi atık miktarlarına karar verilmiştir. 2018 – 2022 arası KDB ve patolojik atıklar taşıeron firmadan alınmıştır ve 2022 verileri Tablo 2.3’ te gösterilmektedir. Patolojik atıklar sadece 1, 4, 8 ve 9 numaralı atık üreticilerinde üretilmektedir. 9 adet tıbbi atık üreticilerinin listesi de Tablo 2.2’ de verilmiştir.

Tablo 2.3: Eskişehir majör tıbbi atık üreticilerinden (hastanelerden) çıkan 2022 yılı KDB ve Patolojik tıbbi atık miktarları

Atık Tipi	Hastaneler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Toplam
Kesici-Delici, Bulaşıcı Atık		360	6	18	360	0,6	24	12	48	180	1008,6
Patojenik Atık		3,87	0	0	3,87	0	0	0	0,52	1,93	10,19

Sterilizasyon, yakma ve bertaraf işlemleri için ortalama birim maliyetler literatürden (Arıkan vd., 2016)’nin yaptığı çalışmadan alınmıştır. Benzer şekilde sterilizasyon tesisi ve yakma tesisi kurulum maliyetleri de literatürden (Arıkan vd., 2016)’nin yaptığı çalışmadan oranlama yapılarak alınmış ve probleme entegre edilmiştir. Bu tesislerin açılış fiyatlarının tayini açılan tesislerin m² lerine göre oranlanmıştır. Tablo 2.4’ te belirtilen birim ve açılış maliyetleri listelenmiştir. Ankara Bertaraf Tesisi’nde yapılan işlemlerin maliyeti daha önce belirtildiği gibi Eskişehir’deki yakma ve bertaraf işlem maliyetlerinin toplamının 2 katı olarak kabul edilmiştir.

Tablo 2.4: Tıbbi atık süreçleri birim ve tesis açılma maliyetleri

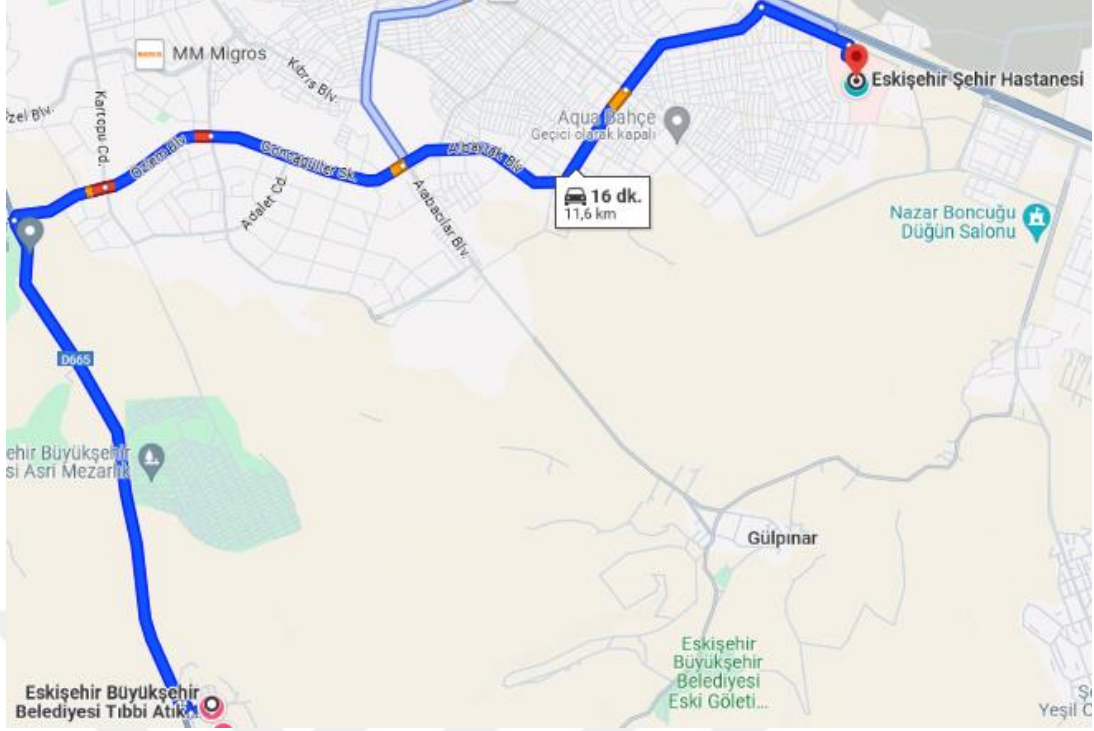
No	Veri	Birim Maliyet [Euro]	Toplam Maliyet [Euro]
1	Sterilizasyon Tesisi Sabit Kurulum Maliyeti (12 ton/gün kapasiteli tesis için)		102.964
2	Yakma Tesisi Sabit Kurulum Maliyeti (2 ton/gün kapasiteli tesis için)		12.000
3	Tıbbi Atık Toplama Maliyeti (1 ton için)	15	
4	Tıbbi Atık Taşıma Maliyeti (1 km için)	15	
5	Sterilizasyon İşlem Maliyeti (1 ton için)	388,3	
6	Yakma İşlem Maliyeti (1 ton için)	443,7	
7	Sterilize Atıkların ve Küllerin Bertaraf Maliyeti (1 ton için)	221,9	
8	Ankara Yakma + Bertaraf Maliyeti (1 ton için)	1331,2	
9	Karbon Emisyon Maliyeti (1 ton için)	30	

Birim emisyon salınım miktarları literatürden (Rizan vd., 2021)'nin yaptığı çalışmadan alınmıştır. Tablo 2.5' te gösterilmektedir. Emisyon miktarlarının hepsi CO₂(e) olarak hesaplanmıştır. Karbondioksit eşdeğeri veya CO₂(e), başka bir sera gazının bir metrik tonunun küresel ısınma potansiyeli ile aynı olan karbondioksit emisyonlarının sayısıdır. CO₂(e) sera gazlarının etkilerini karşılaştırılabilir hale getirerek, karbon ayak izini hesaplamak, sera gazı emisyonlarını izlemek ve azaltma stratejileri geliştirmek için kullanılır. CO₂(e) hesaplamaları, iklim değişikliği ile mücadelede politika oluşturma, endüstriyel faaliyetlerin izlenmesi ve karbon ticareti gibi alanlarda önemli bir rol oynar. Ayrıca, işletmeler, kurumlar ve hükümetler tarafından çevresel etkilerin ölçülmesi ve raporlanması için kullanılır. Bu nedenle, CO₂(e) hesaplamaları, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik çabaları yönlendirmede önemli bir araç olarak hizmet eder.

Tablo 2.5: Birim karbon emisyon miktarları

No	Veri	Değer	Birim
1	Tıbbi Atıkların Taşınması ve Toplanması Sırasındaki Emisyon Faktörü	0,567	kg* CO ₂ (e)/ton*km
2	KDB Atıkların Sterilizasyonu Sırasındaki Emisyon Faktörü	569	kg* CO ₂ (e)/ton*km
3	Patolojik Atıkların Yakılması Sırasındaki Emisyon Faktörü	1074	kg* CO ₂ (e)/ton*km
4	Sterilizasyon Tesisi Açma Emisyon Miktarı	1428,57	ton
5	Yanma Tesisi Açma Emisyon Miktarı	214,28	ton

Farklı tesisler arasındaki yol verileri Google Haritalar kullanarak alınmıştır. İstasyonlar arasında araçların geçebileceği en müsait yollar seçilmiştir. Şekil 2.8' de örnek bir görüntü gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Eskişehir Şehir Hastanesi – Sterilizasyon tesisi arası mesafe tayini

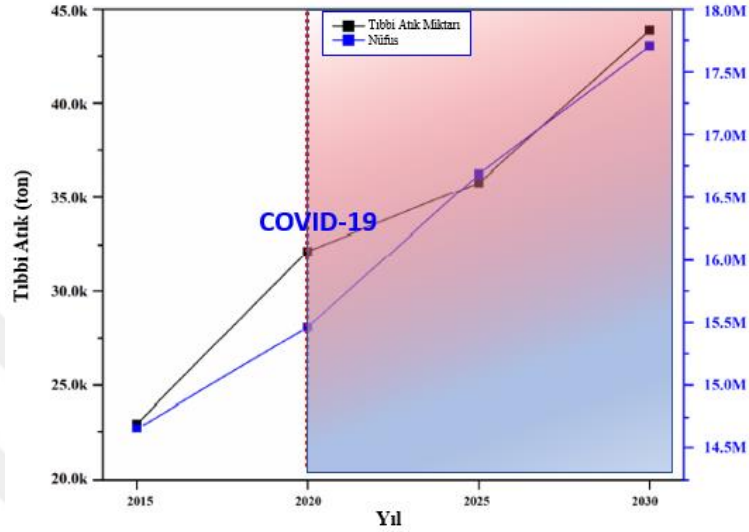
Çalışmayı daha fazla genişletmek amacı ile daha sağlıklı bir rotalama problem çözülerek bu tezin içeriğine girdi olarak yollar gelecek çalışmalarda sağlanabilir. Fakat bu çalışmada sadece tesisler arasındaki mesafeler dikkate alınmıştır. Tablo 2.6’ da tesisler arasındaki yolların matrisi gösterilmektedir.

Tablo 2.6: Tesisler arasındaki yolların (km) matrisi

No	Hastaneler									Sterilizasyon	Ankara	Yakma	Depolama
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	9,6	8,5	11,1	11,1	14,2	7,9	11,8	12,3	11,6	-	11,6	-
2	9,6	0	1,6	2,5	2,4	7,9	6,2	7,2	7,8	7,7	-	7,7	-
3	8,5	1,6	0	3,7	1,1	7,3	4,4	3,8	4,7	8,5	-	8,5	-
4	11,1	2,5	3,7	0	4	7,1	9,6	5,7	6,2	7,9	-	7,9	-
5	11,1	2,4	1,1	4	0	6,6	4,5	3,1	4	9,4	-	9,4	-
6	14,2	7,9	7,3	7,1	6,6	0	7,1	3,1	3,4	15,2	-	15,2	-
7	7,9	6,2	4,4	9,6	4,5	7,1	0	5,3	6,4	15	-	15	-
8	11,8	7,2	3,8	5,7	3,1	3,1	5,3	0	2,4	14,7	-	14,7	-
9	12,3	7,8	4,7	6,2	4	3,4	6,4	2,4	0	14,7	-	14,7	-
10	11,6	7,7	8,5	7,9	9,4	15,2	15	14,7	14,7	0	219	0	0,13
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-
12	11,6	-	-	7,9	-	15,2	-	14,7	14,7	-	-	0	0,13
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0

Tıbbi atık miktarı ileride izah edilecek senaryolarda belirli oranlarda ileri yılların analizleri için arttırılmıştır. Bu arttırma oranlarının tayini için de literatürde yapılan yöntemler incelenmiştir. Balcı vd., (2022)’ye göre yıllar içerisinde arttırılan tıbbi atık

miktarı öncelikle ilgili çalışma bölgesindeki nüfus artışı ile doğru orantılı olarak düşünülebilir. Şekil 2.9’ da Türkiye içinde nüfus artışı ve bununla ilişkili olacak şekilde tıbbi atık artışı gösterilmektedir. Aynı zamanda Tablo 2.7’ de 2014 – 2020 arası TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) tıbbi atık ve nüfus verileri gözlemlenebilir.



Şekil 2.9: Türkiye’de yıllar içerisinde nüfus ve tıbbi atık miktarı değişimi (Balcı vd. (2022))

Tablo 2.7: 2014 – 2020 Arası TÜİK verilerine göre nüfus ve tıbbi atık artışı

Yıl	Nüfus	Tıbbi Atık [ton]
2014	14.377,02	19.265,90
2015	14.657,43	23.526,30
2016	14.804,12	24.712,80
2017	15.029,23	27.068,70
2018	15.067,72	28.171,80
2019	15.519,27	29.065,20
2020	15.462,45	32.143,10

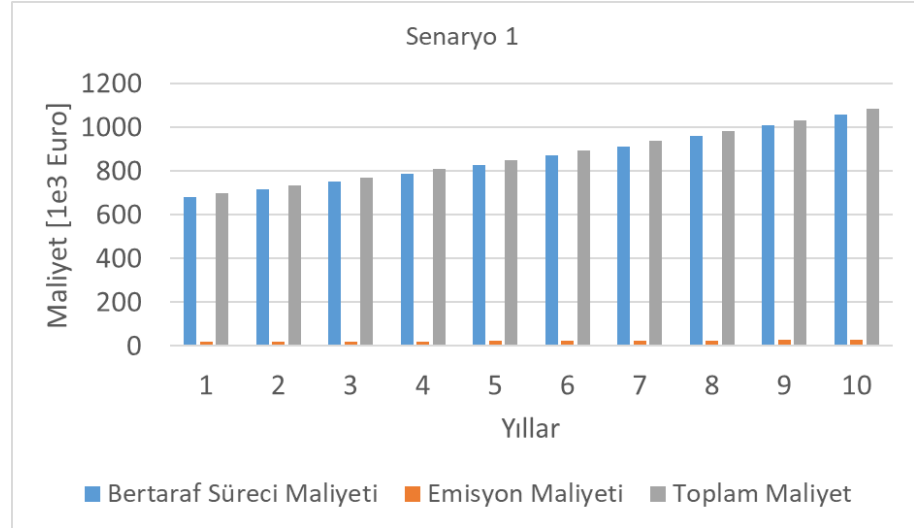
Görüleceği üzere veriler COVID-19 başlangıcına kadar yaklaşık olarak %5 civarı düzenli artış ile devam ederken COVID-19 zamanında yaklaşık %10’luk bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Buradaki verilerden yola çıkarak senaryolardaki tıbbi atık artış miktarlarında benzer seviyelerde tutulmuştur.

2.2.6.6. Senaryolar

Bu çalışmada toplam 5 adet senaryo çalışılmıştır. Senaryolarda tıbbi atık sayılarındaki, maliyetlerdeki, emisyon salınımındaki değişiklikler çeşitli kombinasyonlarla modele uygulanmıştır. Senaryolar ile birlikte tıbbi atık artışı, maliyet artışı ve tüm işlemler sırasında ortaya çıkan emisyon miktarları sayısal olarak incelenmiştir. Bazı senaryolarda farklı amaç fonksiyon ağırlık değerleri de denenmiştir. Ayrıca yakma işleminin Eskişehir içerisinde icra edildiği süreç ve mevcuttaki patolojik atık yakma süreci karşılaştırılmıştır. Bununla amaçlanan Eskişehir’de yakma işleminin, emisyon miktarını kabul edilebilir bir artış içinde tutarak daha düşük maliyetle yapılmasının mümkün olup olmadığını ortaya koymaktır.

Senaryo 1

- Senaryo 1, tıbbi atık sayılarının her yıl bir önceki yıla göre %5 arttığı senaryodur. Bu senaryo referans olarak düşünülmüştür.
- Model, maliyet ve emisyon salınımı amaç fonksiyon değerlerine eşit ağırlık verilerek (0,5, 0,5) çözülmüştür.
- Senaryo 1’de model, 30 yıl için hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda maliyetlerde ve emisyon salınım miktarlarında bir önceki yıla göre %5 artış görülmektedir. Aynı zamanda Ankara’nın eşit ağırlık kabulü ile optimal seçenek olarak hesaplandığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla beklendiği üzere denenen bütün yıllarda patolojik atıklarının yakılması için yakma tesisinin Eskişehir’de kurulması yerine mevcutta olan Ankara bertaraf tesisinde yakılmasının daha mantıklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Maliyet ve emisyon salınımı amaç fonksiyon değerleri maliyet veya emisyon lehine değiştirildiğinde bile, ortaya çıkan sonuç değişmemektedir. Bu durum irdelendiği zaman, Ankara seçeneğinin optimal olarak hesaplanmasının sebebinin ortaya çıkan emisyon miktarının çok fazla olmasından kaynaklandığı görülmüştür. Şekil 2.10’da Senaryo – 1’e 10 yıl içerisindeki maliyet miktarlarının değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Senaryo – 1 10 yıl içerisindeki maliyet miktarları

- Ankara yerine Eskişehir optimal sonuç verseydi, emisyon salınım miktarlarının ne kadar farklılaştığını gösterebilmek için 1., 5. ve 10. yıllardaki Ankara ve Eskişehir’ de oluşan emisyon salınım miktarları karşılaştırılmıştır. Aynı yıl içindeki Eskişehir’deki emisyon miktarını hesaplamak için Ankara’ya çok yüksek bir ek maliyet tanımlanmıştır ve program Eskişehir’ i seçmeye zorlanmıştır. 1. yılda Ankara’ da ve Eskişehir’ de oluşan emisyon salınım miktarları arasındaki fark %26,44, 5. yılda %22,80, 10. yılda %18,76 olarak ortaya çıkmıştır. Eskişehir’ de yakma tesisi açıldığında ortaya çıkacak emisyon miktarı sabit olduğundan ve Sterilizasyon tesisi ile Ankara bertaraf tesisi arasındaki yollar, Eskişehir içi yollardan daha uzun olduğundan dolayı yıllar içinde Eskişehir’ de ortaya çıkan emisyon miktarı Ankara’ da ortaya çıkan emisyon miktarına yaklaşmaktadır. Tablo 2.8’de Senaryo – 1’e Ankara ve Eskişehir seçenekleri için ortaya çıkan CO₂(e) miktarı gösterilmiştir.

Tablo 2.8: Senaryo-1 Ankara ve Eskişehir seçenekleri için ortaya çıkan CO₂(e) miktarı

Yıl	Emisyon Salınımı [ton]		Emisyon Salınımı Farkı (%)
	Ankara	Eskişehir	
1	592.575,68	805.595,54	26,44
5	720.278,71	933.025,43	22,8
10	919.281,93	1.131.604,05	18,76

Bu senaryodan anlaşılabacağı üzere mevcut emisyon üretimleri ile yakın zamanda Eskişehir’de Yakma tesisinin kurulması hava kirliliği bakımından uygun gözükmemektedir.

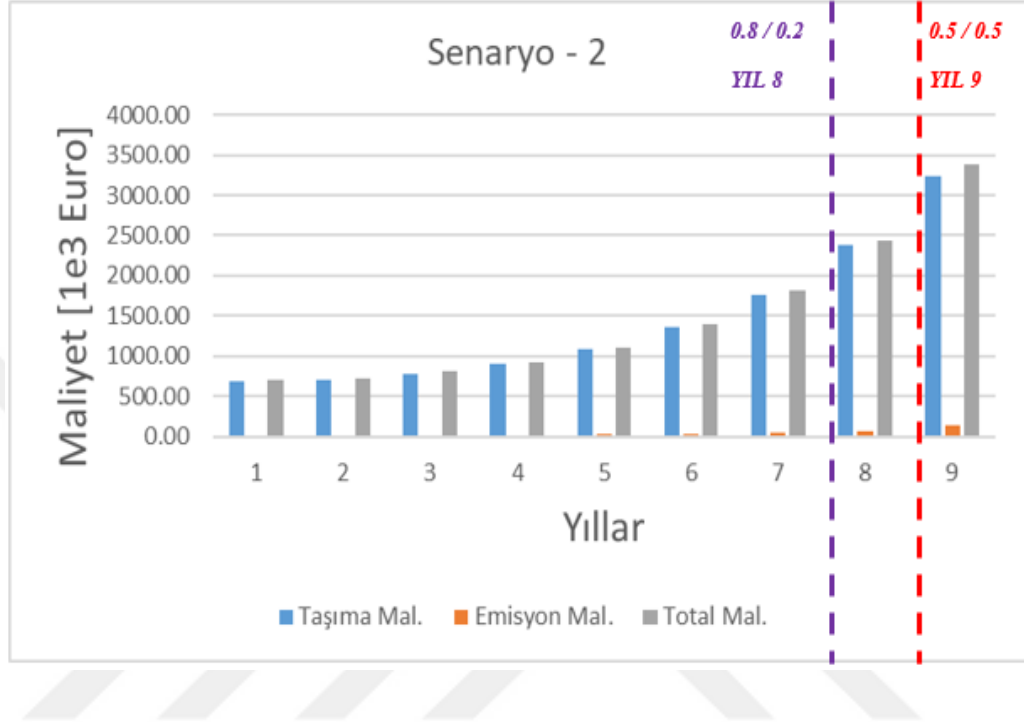
Senaryo 2

- Senaryo 2, tıbbi atık sayılarının her yıl bir önceki yıla göre %5, %10 ve %15 gibi oranlarda arttığı senaryodur. Bu senaryo, COVID-19 veya benzeri bir ağır pandemik senaryo olarak düşünülmüştür. Model, maliyet ve emisyon salınımı amaç fonksiyon değerlerine eşit ağırlık verilerek (0,5, 0,5) çözülmüştür. Maliyetlerde ve emisyon salınım miktarlarında 9. yıla kadar tıbbi atık sayılarındaki artış oranları kadar artış görülmektedir. 9. yılda Eskişehir optimal sonuç verdiği için maliyetlerde ve emisyon salınım miktarlarında artış oranları değişmektedir. Bertaraf süreci maliyeti 8. yıla göre %36,17, emisyon maliyeti %118,99, toplam maliyet %38,28 (Ankara optimal sonuç verseydi toplam maliyet bir önceki yıla göre %40 artacaktı.), emisyon salınım miktarı %118,99 artmaktadır. Dolayısıyla 9. yıldan sonra patolojik atıklarının yakılması için mevcutta olan Ankara bertaraf tesisinde yakılması yerine yakma tesisi Eskişehir’de kurulması daha mantıklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tablo 2.9’da Senaryo – 2’ye ait maliyet ve emisyon miktarı verileri verilmiştir. Ek-A’da Senaryo – 2, yıl 8 ve 9 için GAMS çıktıları mevcuttur.

Tablo 2.9: Senaryo – 2 İlk 9 yıl için maliyet ve emisyon miktarları
($w_1 = 0,5, w_2 = 0,5$)

Yıl	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sterilizasyon Tesisi Adedi	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Eskişehir Yakma Tesisi Adedi	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Maliyet [Euro]	Bertaraf Süreci	681.305,91	715.372,87	786.908,45	904.931,53	1.085.919,25	1.357.411,51	1.764.617,95	2.382.262,49
	Yüzdelik Artış (Bertaraf Süreci)		5	10	15	20	25	30	35
	Emisyon Salmımı	17.777,27	18.666,15	20.532,72	23.612,78	28.334,99	35.419,09	46.044,36	62.160,32
	Yüzdelik Artış (Emisyon Salmımı)		5	10	15	20	25	30	35
	Toplam Maliyet (OBJ1)	699.083,18	734.039,02	807.441,17	928.544,31	1.114.254,25	1.392.830,60	1.810.662,31	2.444.422,82
Emisyon Salmımı [Ton]	Yüzdelik Artış (Toplam Maliyet)		5	10	15	20	25	30	35
	Emisyon Salmımı (OBJ2)	592.575,68	622.205,04	684.423,82	787.092,58	944.499,80	1.180.636,25	1.534.812,14	2.072.010,69
	Yüzdelik Artış (Emisyon Salmımı)		5	10	15	20	25	30	35
Sonuç	E / A	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	ESKİŞEHİR

- Maliyet ve emisyon salınımı amaç fonksiyon değerleri için 0,8' e 0,2 değerleri verildiğinde, yani maliyetin önemi emisyondan daha fazla olduğunda, 8. yıldan itibaren Eskişehir sonucunun optimal çıktığı görülmüştür. Şekil 2.11'de Senaryo – 2 için yıllar içindeki maliyet artışlarının şematığı mevcuttur.



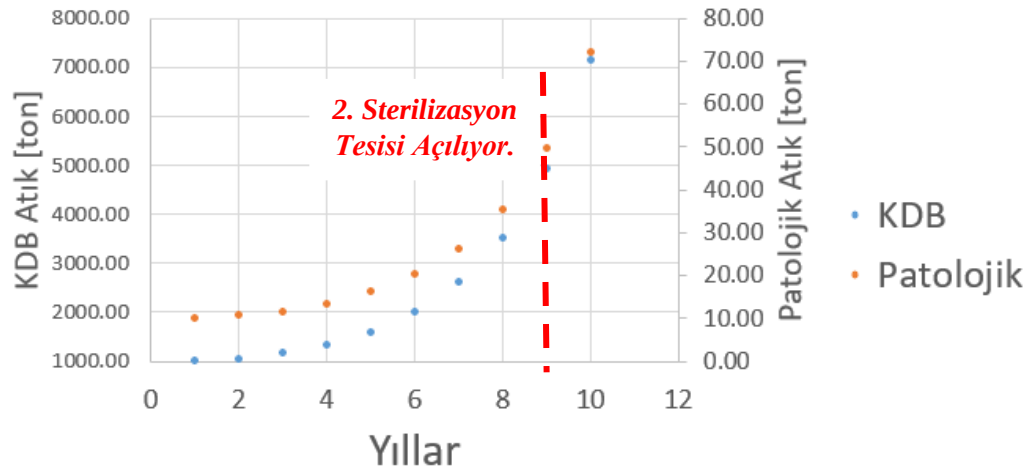
Şekil 2.11: Senaryo – 2 Yıllar içinde maliyet artışları

- Eskişehir optimal çıkmasına rağmen mevcutta Eskişehir' in kalabalık ilçelerinde hava kirliliği problemi olduğu bilinmektedir. Bu rapora göre Odunpazarı ve Tepebaşı ilçelerinde 2022 yılının %26'sında hava kirliliği seviyesi normal seviyelerin üzerine çıkmıştır. Tablo 2.10'da bu veriler gösterilmektedir. CO seviyesi ise yıl içerisinde sınır değeri aşmamıştır. Fakat artan nüfus ve araç sayısı ile birlikte bu verilerde zamanla artış eğiliminde olabilir. Dolayısı ile Eskişehir'de yakma tesisinin açılması kararı üzerinde düşünülmesi gereklidir. Karar vericilerin 8 yıl sonraki Eskişehir hava kalitesi verileri ile birlikte bu konu üzerinde detaylı çalışma yapmaları önemlidir. Benzer bir yorum da nüfus artış oranı içinde eklenebilir. Eskişehir'de bu denli tıbbi atık artışının ne mertebede mümkün olduğu da tartışmalıdır.

Tablo 2.10: 2022 Yılı Odunpazarı ve Tepebaşı sınır seviye üzerindeki tozlu gün sayıları

Aylar	PM10	
	Odunpazarı	Tepebaşı
Ocak	8	7
Şubat	12	7
Mart	8	5
Nisan	17	9
Mayıs	1	9
Haziran	0	18
Temmuz	0	5
Ağustos	1	0
Eylül	5	9
Ekim	10	6
Kasım	16	8
Aralık	14	16
Toplam	92	99

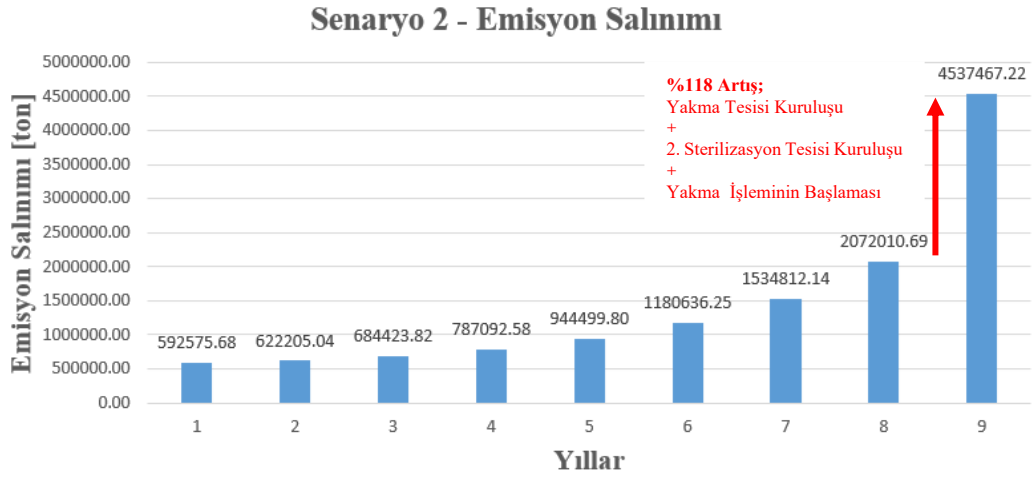
Senaryo 2 - KDB Atık ve Patolojik Atık



Şekil 2.12: Senaryo – 2 Sterilizasyon tesisi açılması

- Maliyet ve emisyon salınımı amaç fonksiyon değerleri eşit olduğunda (0,5, 0,5), 9. yılda, tıbbi atık artışlarına bağlı olarak 1. sterilizasyon tesisine ek olarak 2. sterilizasyon tesisi açılması kararı çıkmıştır. Maliyet ve emisyon salınımı amaç fonksiyon değerleri 0,8' e 0,2 olduğunda, 8. yılda, tıbbi atık artışlarına bağlı olarak 1. sterilizasyon tesisine ek olarak 2. sterilizasyon tesisi açılması kararı çıkmıştır. Şekil 2.12'de bunun şematığı mevcuttur.

Şekil 2.13'de Senaryo – 2 için emisyon salınımı miktarı ve Eskişehir'de yakma tesisi açılması durumunun şematığı görülmektedir.

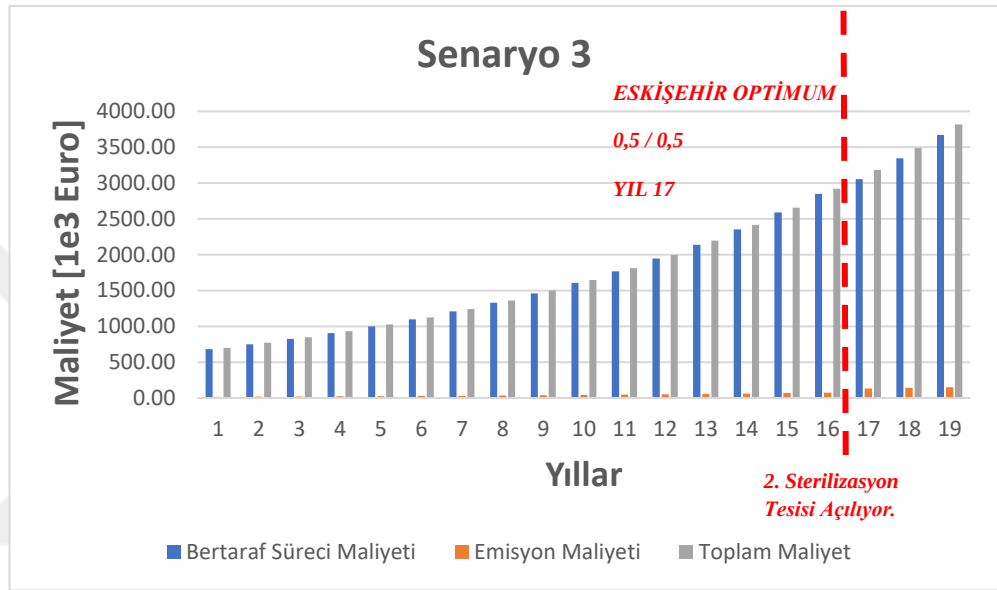


Şekil 2.13: Senaryo – 2 Emisyon miktarı ve Eskişehir'de yakma tesisi açılması

Senaryo 3

- Senaryo 3, tıbbi atık sayılarının her yıl bir önceki yıla göre %10 arttığı senaryodur.
- Model, maliyet ve emisyon salınımı amaç fonksiyon değerlerine eşit puan verilerek (0,5, 0,5) çözülmüştür. 17. yıldan itibaren Eskişehir sonucunun optimal çıktığı görülmüştür. Alınan sonuçlara göre emisyon salınımı miktarının 17. yılda 16. yıla göre 76,14 arttığı görülmektedir.
- Ayrıca 17. yıla kadar tüm yıllarda bir önceki yıla göre maliyette ve emisyon salınımı miktarında %10' luk bir artış olmaktadır. 17. yılda Eskişehir optimal olunca bertaraf süreçleri maliyeti 16. yıla göre %7,24 lük, emisyon maliyetinde %76,14 lük, toplam maliyette %9'luk, emisyon salınımı miktarında da %76,14

lük bir artış olduğu görülmüştür. Emisyon salınımı miktarındaki artışın nedeni Eskişehir’ de yakma tesisi, 2. sterilizasyon tesisi açıldığında ve patolojik atıkların Eskişehir’ de yakılması işlemi sonucunda emisyonun ortaya çıkmasıdır. Tıbbi atık artışına bağlı olarak 17. yılda 1. sterilizasyon tesisine ek olarak 2. sterilizasyon tesisi açılması kararı çıkmıştır. Şekil 2.14’te Senaryo – 3’e ait maliyet artışı, Eskişehir sterilizasyon ve yakma tesisi açılması durumunun şematığı görülmektedir.



Şekil 2.14: Senaryo – 3 Maliyet artışı ve Eskişehir’de tesis açılması

- Bu senaryoyu 1. senaryo ile düşünüldüğünde, Eskişehir’de yakma tesis kurulumunun, eşit önemde amaç fonksiyonları için, uzun bir zaman periyot sonrasında optimal olduğu görülmektedir. 1. senaryoda 30.yılda dahi Eskişehir yakma tesisi kurulumu Ankara opsiyonuna göre uygun olarak belirlenmezken, bu senaryoda ise ancak 17. yıl’ da optimal seçenek olarak hesaplanmıştır. Diğer senaryolara benzer olarak, yakma tesisi kurulum emisyon miktarının yüksekliği de bu süreyi uzun kılmaktadır. Fakat amaç fonksiyonu önem ağırlıkları maliyet lehine değiştiğinde bu sürenin daha azalacağı öngörülmektedir. Dolayısı ile önem ağırlıklarının seçimi yapılırken Eskişehir – Ankara maliyet farkları iyi değerlendirilmelidir.

Tablo 2.11’de Senaryo – 3’e ait yıllar içerisindeki maliyet ve emisyon salınımı miktarları görülmektedir.

Tablo 2.11: Senaryo – 3 Yıllar içerisindeki maliyet ve emisyon değişimleri ($w_1 = 0,5, w_2 = 0,5$)

8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1.327.637,76	1.460.420,66	1.606.442,34	1.767.086,57	1.943.795,23	2.138.174,75	2.351.992,23	2.587.164,89	2.845.937,48	3.052.090,79
10	10	10	10	10	10	10	10	10	7,24
34.642,67	38.106,98	41.917,50	46.109,25	50.720,17	55.792,19	61.371,41	67.508,26	74.259,46	130.797,12
10	10	10	10	10	10	10	10	10	76,14
1.362.280,43	1.498.527,64	1.648.359,83	1.813.195,82	1.994.515,40	2.193.966,94	2.413.363,63	2.654.673,16	2.920.196,93	3.182.887,91
10	10	10	10	10	10	10	10	10	8,99
1.154.755,62	1.270.232,61	1.397.249,91	1.536.974,89	1.690.672,38	1.859.739,62	2.045.713,58	2.250.275,47	2.475.315,21	4.359.903,95
10	10	10	10	10	10	10	10	10	76,14
Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	ESKİŞEHİR

Tablo 2.11 Devamı

Yıl	1	2	3	4	5	6	7
Sterilizasyon Tesisi Adedi	1	1	1	1	1	1	1
Eskişehir Yakma Tesisi Adedi	0	0	0	0	0	0	0
Bertaraf Süreci	681.305,91	749.392,58	824.382,07	906.853,28	997.460,57	1.097.188,78	1.206.910,80
Yüzdelik Artış (Bertaraf Süreci)	10	10	10	10	10	10	10
Emisyon Salınımı	17.777,27	19.554,67	21.510,57	23.661,86	26.027,52	28.629,89	31.492,96
Yüzdelik Artış (Emisyon Salınımı)	10	10	10	10	10	10	10
Toplam Maliyet (OBJ1)	699.083,18	768.947,25	845.892,64	930.515,14	1.023.488,09	1.125.818,67	1.238.403,76
Yüzdelik Artış (Toplam Maliyet)	10	10	10	10	10	10	10
Emisyon Salınımı (OBJ2)	592.575,68	651.822,39	717.018,95	788.728,70	867.583,99	954.329,67	1.049.765,51
Yüzdelik Artış (Emisyon Salınımı)	10	10	10	10	10	10	10
Sonuç	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara	Ankara

Senaryo 4

- Senaryo 4, tıbbi atık sayılarının %5 arttığı ve emisyon salınımı miktarının her yıl bir önceki yıla göre %5 azaldığı senaryodur.
- Senaryo 4'te model, 30 yıl için çözülmüştür. Programda Ankara'nın optimal seçenek olarak hesaplandığı görülmektedir. Dolayısıyla beklendiği üzere denenen bütün yıllarda patolojik atıklarının yakılması için yakma tesisinin

Eskişehir’de kurulması yerine mevcutta olan Ankara bertaraf tesisinde yakılmasının daha mantıklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- Tıbbi atık sayılarında çok fazla bir değişim olmadığı için 30 yıl boyunca 2. sterilizasyon tesisine ihtiyaç duyulmamıştır.
- Her yıl bir önceki yıla göre bertaraf işlem maliyetinde %5’lik, Toplam maliyette yaklaşık %5’lik bir artış olurken, emisyon maliyetinde ve emisyon salınım miktarında %0,25’lik bir azalma olmuştur.
- Maliyet ve emisyon salınımı amaç fonksiyon değerleri için 0,8’ e 0,2 değerleri verildiğinde, yani maliyetin önemi emisyonundan daha fazla olduğunda, 9. yıldan itibaren Eskişehir sonucunun optimal çıktığı görülmüştür. Emisyon salınımı miktarı 9. Yılda 8. yıla göre %19 artmıştır. Karar vericilerin bu artışı değerlendirmesi gerekmektedir.

Tablo 2.12’de Senaryo – 4 için yıllar içinde $w_1 = 0,8$, $w_2 = 0,2$ ağırlıklar için emisyon miktarı değişimi gösterilmiştir.

Tablo 2.12: Senaryo – 4 Yıllar içinde $w_1 = 0,8$, $w_2 = 0,2$ ağırlıklar için emisyon miktarı değişimi

Yıl	Emisyon Salınımı [ton]	Önceki Yıla Göre % Artış	E/A
1	592.575,68	0	Ankara
2	591.094,79	-0,25	Ankara
3	589.616,01	-0,25	Ankara
4	588.150,99	-0,25	Ankara
5	586.671,51	-0,25	Ankara
6	585.201,53	-0,25	Ankara
7	583.728,79	-0,25	Ankara
8	582.287,84	-0,25	Ankara
9	721.740,14	19,32	ESKİŞEHİR
10	713.236,72	-1,19	ESKİŞEHİR

- Ayrıca Eskişehir yerine Ankara optimal sonuç verseydi, toplam maliyetin ne kadar farklılaştığını gösterebilmek için 9. ve 10. yıllardaki Ankara ve Eskişehir’ de oluşan toplam maliyetler karşılaştırılmıştır. Ankara için de yıl 9 ve 10 için maliyet hesaplaması yapıldığında Ankara’nın maliyetinin yaklaşık % 5 daha fazla olduğu görülmektedir. Bu tarz yakın miktarlar için Eskişehir’de emisyon üretiminin ne mertebede uygun olduğu araştırılabilir.

Tablo 2.13’de Eskişehir ve Ankara optimal durumlarının maliyet farkları gösterilmiştir.

Tablo 2.13: Eskişehir ve Ankara optimal durumlarının maliyet farkları

Yıl	TOPLAM MALİYET		Maliyet Farkı (%)
	Eskişehir	Ankara	
9	978.038,58	1.023.990,58	4,487
10	1.025.015,79	1.074.321,20	4,589

Senaryo 5

- Senaryo 5, tıbbi atık sayılarının ve *maliyetin* %10 arttığı, emisyon salınımı miktarının her yıl bir önceki yıla göre %10 azaldığı senaryodur. Bu senaryo bütün muhtemel değişikliklerin kombine edildiği gerçeğe en yakın senaryodur.
- Senaryo 5’te model, 30 yıl için çözülmüştür. Amaç fonksiyonları eşit önem ile çözüldüğü zaman Eskişehir 17. yılda optimal sonuç olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2.14’te Senaryo – 5 için Eskişehir ve Ankara maliyet ile emisyon farkları gösterilmiştir.

Tablo 2.14: Senaryo – 5 Eskişehir ve Ankara maliyet ile emisyon farkları

$$(w_1 = 0,5, w_2 = 0,5)$$

Yıl	Toplam Maliyet		Maliyet Farkı [Euro]	Emisyon Salınımı		Emisyon Salınımı Farkı [ton]
	Eskişehir	Ankara		Eskişehir	Ankara	
1	669.544,46	696.581,12	27.036,65	784.918,22	592.462,38	192.455,84
2	807.831,29	841.760,11	33.928,82	765.100,11	586.564,29	178.535,81
3	974.679,70	1.017.196,81	42.517,11	745.782,37	580.724,92	165.057,45
4	1.175.988,76	1.229.197,41	53.208,64	726.952,39	574.943,68	152.008,70
5	1.418.875,94	1.485.382,43	66.506,49	708.597,83	569.220,00	139.377,83
6	1.709.779,72	1.793.840,47	84.060,75	687.921,73	563.472,13	124.449,59
7	2.062.915,37	2.167.706,42	104.791,05	670.552,65	557.862,65	112.689,99
8	2.488.987,19	2.619.492,21	130.505,02	653.622,11	552.309,01	101.313,09
9	3.003.059,32	3.165.437,60	162.378,28	637.119,04	546.810,66	90.308,38
10	3.626.282,00	3.826.206,00	199.924,00	623.179,00	541.315,00	81.864,00
11	4.378.841,62	4.624.906,31	246.064,69	609.543,96	535.874,57	73.669,39
12	5.287.579,37	5.590.331,10	302.751,73	596.207,26	530.488,83	65.718,43
13	6.384.906,79	6.757.283,22	372.376,42	583.162,36	525.157,21	58.005,15
14	7.709.961,77	8.167.830,44	457.868,67	570.402,88	519.879,18	50.523,71
15	9.310.004,43	9.872.821,95	562.817,52	557.922,58	514.654,19	43.268,39
16	11.242.102,75	11.933.721,43	691.618,69	545.715,34	509.481,72	36.233,62
17	13.575.167,99	14.424.822,81	849.654,82	533.775,19	504.361,23	29.413,97
18	16.392.412,55	17.435.928,46	1.043.515,91	522.096,29	499.292,20	22.804,09
19	19.794.317,77	21.075.586,53	1.281.268,75	510.672,93	494.274,12	16.398,81
20	23.902.217,87	25.475.004,01	1.572.786,14	499.499,51	489.306,48	10.193,03
Eskişehir’de Yakma Tesisi Kurulursa 20. Yıl Sonunda Oluşacak Maliyet Tasarrufu [Euro]			8.285.580,15	Eskişehir’de Yakma Tesisi Kurulursa 20. Yılın Sonunda Oluşacak Emisyon Salınımı Miktarı [ton]		1.744.289,29

- Amaç fonksiyonları maliyet lehine 0,8 / 0,2 olacak şekilde çözüldüğü zaman da Eskişehir' in 8. yılda optimal seçenek olduğu belirlenmiştir. Burada maliyetin artışı ve emisyon azalması birbirini nötrleştirecek şekilde etki ediyor olup, sonucun Senaryo 3' e benzer çıkmasına sebebiyet vermektedir.
- Emisyon miktarının her yıl %10 oranında azalması çok kabul edilir bir varsayım olmayacaktır. Her zaman belirli bir miktar emisyon miktarı salınımı olacaktır. Dolayısı ile yıllar içerisinde emisyon miktarı azalma oranı da azalacaktır. Fakat maliyet açısından 20 yılı incelediğimiz zaman Eskişehir içerisinde yakma işlemi icrası yolların kısılalığından kaynaklı olarak ciddi bir maliyet tasarrufu elde edilebileceği görülmektedir. 20 yıl içerisinde ortalama olarak 8,3 milyon Euroluk bir tasarruf miktarı hesaplanmıştır. Buradan sağlanan tasarruf ile Eskişehir' deki emisyon miktarını azaltıcı çalışmalara yatırım yapılabilir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tıbbi atık tersine lojistik ağ tasarımı, sağlık sektöründeki atık yönetiminde önemli faydalar sağlar. Bu sistem, atıkların etkili bir şekilde toplanması, taşınması, işlenmesi ve geri dönüştürülmesini kolaylaştırır. Ayrıca, tıbbi atıkların doğru ve güvenli bir şekilde bertaraf edilmesini sağlamak için geri dönüşüm ve yeniden kullanım süreçlerini yönetir. Bu sistemlerin kullanılması, çevresel etkileri azaltır ve doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunur. Aynı zamanda maliyet tasarrufu sağlar ve sağlık kuruluşlarının atık yönetimi süreçlerini optimize eder. Bu sistemler, atıkların izlenmesini ve raporlanmasını kolaylaştırarak yasal uyumluluğu artırır ve kurumların risklerini azaltır. Ayrıca, tıbbi atık tersine lojistik ağları, sağlık kuruluşlarının sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarına yardımcı olur ve toplum sağlığını korur. Bu nedenlerden dolayı, tıbbi atık tersine lojistik ağ tasarımı, sağlık sektöründe önemli bir gerekliliktir.

Tıbbi atık tersine lojistik ağ tasarımı ile farklı parametrelerin, örneğin yol uzunlukları, sterilizasyon tesisi kurulum konumları ve emisyon miktarı gibi faktörlerin optimize edilmesi mümkün olur. Bu optimizasyon çalışmaları, maliyetleri azaltarak verimliliği artırabilir ve kaynakların daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir. Ayrıca, çevresel etkilerin değerlendirilmesiyle, atık yönetimi süreçlerinin çevresel sürdürülebilirlik açısından iyileştirilmesi hedeflenir. Bu çalışmalar, tıbbi atık yönetiminin daha sürdürülebilir ve çevre dostu hale getirilmesine katkıda bulunabilir.

Bu çalışmanın sonucunda ortaya çıkan bulgular sayısal olarak incelendiği zaman emisyon maliyetlerinin genel anlamda toplam maliyetin %5' inin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Dolayısı ile bu skaladaki bir çalışmada emisyonun maliyet anlamında belirleyici bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir.

İlk senaryo verilerine göre maliyet ve emisyon salınımının eşit olduğu durumda Ankara bertaraf tesisi ile mevcut durumun devam etmesinin optimal olduğu görülmüştür. Simülasyonlar, artan tıbbi atık trendi ile 30 yıl için incelenmiştir. Bu senaryodan, maliyet ve emisyon salınımı amaçları için eşit önem kabulünün Eskişehir'de yakma tesisi kurulması durumunun mantıklı olmadığı görülmüştür. Dolayısı ile maliyetin daha ön planda olduğu senaryolar da incelenmiştir.

İkinci senaryo içerisinde tıbbi atık artışı ilk senaryoya göre daha farklı değerlerde denenmiş ve COVID-19 gibi bir senaryonun uzun süreli etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Bu senaryoda, eşit amaç fonksiyonu önemleri ile, Eskişehir’de yakma tesisi kurulmasının 9.yılda optimal olduğu görülmüştür. Emisyon verileri incelendiği zaman, emisyon miktarının 8.yıldan 9.yıla %119 arttığı görülmüştür. Önem ağırlıkları maliyet lehine olacak şekilde 0,8 / 0,2 olarak değiştirildiğinde ise Eskişehir senaryosu 8. yılda optimal olarak bulunmuştur. Dolayısı ile olası bir felaket senaryosunda Eskişehir tesisleşmesinin daha erkenden yapılması maliyet olarak fayda sağlayacaktır. Maliyet tasarrufunun sağlanmasıyla birlikte, ortaya çıkabilecek hava kirliliğini azaltmak için emisyon kontrol çalışmaları yapılmalıdır.

Üçüncü senaryoda benzer şekilde ilk senaryoya göre daha yüksek tıbbi atık artışı ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir ve Eskişehir için önerilen tesisleşmenin 17. yılda optimal olduğu görülmüştür. Buradan yapılacak çıkarım ilk senaryoya göre Eskişehir’ in nüfus artışı ve dolayısı ile tıbbi atık artış oranı ile önerilen tesisleşmenin daha yakın gelecekte optimal olacağıdır.

Dördüncü senaryoda değişiklik olarak emisyon miktarlarında iyileşme kabulü yapılmıştır. Fakat emisyon maliyetleri çok az olduğundan benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Son olarak beşinci senaryo ile tıbbi atık ve maliyetlerin artışı ile emisyon miktarlarının iyileştirildiği durum çalışılmıştır. Eskişehir’ in artan nüfusu ve araç motorlarının devamlı geliştirilmesi ile gerçeği daha fazla yansıtabilecek bir senaryo olduğu düşünülmüştür. Bu çalışma kapsamında eşit önemler ile hareket edildiği zaman üçüncü senaryoya benzer sonuçlar elde edilmiştir ve maliyet ile emisyon değişiklikleri birbirlerini dengelemiştir. Fakat maliyet lehine 0,8 / 0,2’lik bir önem ile inceleme yapıldığında sonuçların 8.yılda Eskişehir tesisleşmesi yönünde olduğu görülmektedir. Burada önemli bir detay olarak maliyetler incelendiğinde 8. yılda Eskişehir’ in yaklaşık 130.000 €, tasarruf ettiği gözlemlenmiştir. Bu tasarruf miktarı 18. yılda 1.000.000 €’yu bulmakta ve bu 10 yıllık periyotta ortalama 4.8 milyon €’luk tasarrufun olabileceği öngörülmektedir. Bu tasarruf ile belediye emisyon miktarlarını azaltıcı uygulamalar yapabilir ve artacak olan emisyon miktarını azaltmayı başarabilir.

Genel olarak yapılan çıkarım emisyon ve maliyetin eşit önem ile değerlendirilmesi kısa zamanda Eskişehir tesisleşmesinin optimal olmayacağı yönündedir. Sadece

COVID-19 benzeri pandemi senaryolarında bu durum tersine dönebilir. Ancak, maliyet avantajı ön plana çıktığında ise Eskişehir’de yolların daha kısa olmasından ve dışarıya ödeme yapmaya gerek duyulmayacağından dolayı yüksek tasarruf beklenebilir.

Bu çalışma kapsamında kurulan Eskişehir modeline çeşitli eklemeler yapılarak çalışmanın genişletilmesi ve detaylandırılması önerilmektedir. Öncelikle taşıeron firmanın araçlarının mevcuttaki durumu probleme yansıtılabilir. Bir rotalama modeli çözümü elde edilerek gerçekte daha fazla olacak taşıma süreçleri daha detaylı ve gerçekçi olacak şekilde probleme girdi olarak verilebilir. Bu durum aynı zamanda ortaya çıkan emisyon miktarını da etkileyecektir. Benzer şekilde araçların gün içinde hareket ettiği süre de hesaba katılarak daha yüksek kesinlikte bir emisyon üretim verisi elde edilebilir.

İkincil olarak yapılabilecek genişletme farklı amaç fonksiyonları eklentisi ve farklı çözüm yöntemleri kullanılarak oluşturulan problemlerin çözülmesidir. Örneğin Eskişehir’de açılacak yeni sterilizasyon tesisi ve yakma tesisi bir iş gücü ihtiyacı doğuracaktır. Bu yeni ihtiyaçlara göre 3. bir amaç fonksiyonu eklenmesi mümkündür. Bu sayede sürdürülebilirliğin sosyal boyutu da hesaba katılmış olacaktır. Fakat, aynı zamanda bu tesislerde çalıştırılacak personelin giderleri de maliyet fonksiyonuna eklenmelidir. Amaç fonksiyonları birbiri ile çelişen bir durumda olduğundan dolayı farklı çözüm yöntemleri de probleme uygulanıp sonuçlar değerlendirilmelidir. Örneğin, “Hedef Programlama Yaklaşımı” bu tarz çok amaçlı optimizasyon problemlerine daha uygun olduğundan genişletilmiş probleme uygulanabilir.

Çalışma kendi içerisinde Odunpazarı ve Tepebaşı için yapılmıştır. Fakat, Eskişehir içerisinde kurulacak bir yakma tesisinden ve mevcuttaki sterilizasyon tesisinden çevre iller de faydalanabilir. Öncelikle Eskişehir içerisindeki diğer tıbbi atık kuruluşları (Odunpazarı ve Tepebaşı dışında) probleme katılabilir. İkincil olarak Afyon, Kütahya ve Bilecik gibi Eskişehir’e yakın şehirlerdeki tıbbi atık üreticileri verileri de çalışmaya eklenip sonuçlar irdelenebilir.

Son olarak, Eskişehir’e yakma tesisi kurulması durumunda yakılan ürünlerden elde edilen enerjinin farklı alanlarda kullanılması çalışılabilir.

Sonuç olarak, Eskişehir’deki tıbbi atık yönetim sistemine getirilebilecek bir alternatif senaryo modeli hazırlanmış ve yetkili kişilerin değerlendirebileceği şekilde sayısal

veriler ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Amaçlanan şekilde farklı olası senaryoların değerlendirme şekli fenni yöntem ile icra edilmiş ve Eskişehir Belediyesi'nin genel anlamda önündeki yıllarda mali olarak kazanç elde edebileceği sonucu çıkarılmıştır.



KAYNAKLAR

- [1] Abduaziz, O., Cheng, J. K., Tahar, R. M., & Varma, R. (2015). A hybrid simulation model for green logistics assessment in automotive industry. *Procedia Engineering*, 100, 960-969.
- [2] Adu-Kumi-Jonathan, J. P., Akortia, H. E., Bell, G. K., ve Di Gangi, J. (2019). Persistent organic pollutants (POPs) in eggs: report from Africa.
- [3] Afonso, H., ve do Rosário Cabrita, M. (2015). Developing a lean supply chain performance framework in a SME: a perspective based on the balanced scorecard. *Procedia engineering*, 131, 270-279.
- [4] Agrawal, S., Singh, R. K., ve Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, conservation and recycling*, 97, 76-92.
- [5] Akben, İ., ve GÜNGÖR, A. (2018). TEDARİK ZİNCİRİ VE YALIN TEDARİK ZİNCİRİ. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 5(7), 171-179.
- [6] Akyıldız, A., Köse, E. T., ve Yıldız, A. (2017). Compressive strength and heavy metal leaching of concrete containing medical waste incineration ash. *Construction and Building Materials*, 138, 326-332.
- [7] Arapoğlu, R. İ. F. A. T. Medical Waste Collection Problem: A Case Study in Eskişehir, 5th EurAsia Waste Management Symposium (EWMS) 2020, İstanbul, Türkiye, 26 - 28 Ekim 2020, ss.660-665
- [8] Arıkan, O., Öztürk, İ., Demir, I., ve Maçın, K. Medical Waste Management in Turkey, 2016.
- [9] Aung, T. S., Luan, S., ve Xu, Q. (2019). Application of multi-criteria-decision approach for the analysis of medical waste management systems in Myanmar. *Journal of Cleaner Production*, 222, 733-745.
- [10] Aydemir-Karadag, A. (2022). Bi-objective adaptive large neighborhood search algorithm for the healthcare waste periodic location inventory routing problem. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(3), 3861-3876.
- [11] Balci, E., Balci, S., ve Sofuoglu, A. (2022). Multi-purpose reverse logistics network design for medical waste management in a megacity: Istanbul, Turkey. *Environment Systems and Decisions*, 42(3), 372-387.
- [12] Banar, M., Özkan, A., Altan, M., ve Ayday, C. (2008). Planning of the Healthcare Waste Collection Routes in Eskişehir by Using Gis.
- [13] BARAN, E. (2017). Optimizing medical waste collection in Eskişehir by using multi-objective mathematical model. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 4(4), 93-100.

- [14] BARDAKÇI, H. (2022). SÜRDÜRÜLEBİLİR LOJİSTİKTE DÜNYA’NIN İKİ YENİ TRENDİ TERSİNE LOJİSTİK VE YEŞİL LOJİSTİK UYGULAMALARI: TÜRKİYE İÇİN STRATEJİLER. *Avrasya Dosyası*, 13(2), 9-37.
- [15] Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., & Shetty, C. M. (2013). Nonlinear programming: theory and algorithms. John Wiley & sons.
- [16] Bora, Ö. Ç. A. L. (2021). TERSİNE LOJİSTİK UYGULAMALARININ ÇEVRESEL VE SOSYAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞE ETKİSİ. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 26(4), 521-532.
- [17] Budak, A., ve Ustundag, A. (2017). Reverse logistics optimisation for waste collection and disposal in health institutions: the case of Turkey. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 20(4), 322-341.
- [18] Büyükkeklik, A., ve Ergülen, A. (2016). Tersine lojistik çalışmalarının araştırma yöntemlerine göre sınıflandırılması. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (Ek1), 47-73.
- [19] Bruun, P., ve Mefford, R. N. (2004). Lean production and the Internet. *International Journal of Production Economics*, 89(3), 247-260.
- [20] Çamlıca, Z., ve Akar, G. S. (2014). LOJİSTİK SEKTÖRÜNDE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK UYGULAMALARI. *Gümüşhane University Electronic Journal of the Institute of Social Science/Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi*, 5(11).
- [21] Carter, C. R., ve Ellram, L. M. (1998). Reverse logistics: a review of the literature and framework for future investigation. *Journal of business logistics*, 19(1), 85.
- [22] Chartier, Y. (Ed.). (2014). *Safe management of wastes from health-care activities*. World Health Organization.
- [23] Coşkun, A., ve Akdoğan, M. Ş. (2011). *Üreticilerin tersine lojistik faaliyetlerini etkileyen faktörler: beyaz eşya sektöründe bir uygulama* (Master's thesis, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi).
- [24] Çetin, Ö. Ü. O., ve Sain, A. D. (2018). Lojistik Sektöründe Sürdürülebilirlik Uygulamaları. In *IV. International Caucasus-Central Asia Foreign Trade and Logistics Congress*.
- [25] De Brito, M. P., Dekker, R., ve Flapper, S. D. P. (2005). *Reverse logistics: a review of case studies* (pp. 243-281). Springer Berlin Heidelberg.
- [26] Demirel, N., Gökçen, H. A. D. İ., Akcayol, M. U. H. A. M. M. E. T., & Demirel, E. (2011). A hybrid genetic algorithm for multistage integrated logistics network optimisation problem. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(4).

- [27] Dey, A., LaGuardia, P., ve Srinivasan, M. (2011). Building sustainability in logistics operations: a research agenda. *Management Research Review*, 34(11), 1237-1259.
- [28] DURMUŞCAN, Ö., GÖK, M., ve Sağlığı, İ. TÜRKİYE'DE TIBBİ ATIK SORUNLARI VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ, 2019; Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [29] Erdem, M. (2022). Designing a sustainable logistics network for hazardous medical waste collection a case study in COVID-19 pandemic. *Journal of Cleaner Production*, 376, 134192.
- [30] Erol, İ., ve Özmen, A. (2008). Çevresel düzeyde sürdürülebilirlik performansının ölçülmesi: Parekende sektöründe bir uygulama. *İktisat İşletme ve Finans*, 23(266), 70-94.
- [31] Ersoy, M. Ş. (2006). Lojistik ve Türkiye'nin Konumu, Durum Dergisi, Erişim Yeri: http://www.turktrade.org.tr/index.php?option=com_content&task=view&id=53&Itemid=40, Erişim Tarihi: 01.03.2021. (Aktaran: MÜCEVHER, M. H. (2021))
- [32] Ertaş, H., & Güden, M. A. (2019). Hastanelerde Tıbbi Atık Yönetimi. *Sosyal Araştırmalar ve Yönetim Dergisi*, (1), 53-67.
- [33] Eryılmaz, H., ve Demirarslan, K. O. (2020). 2012-2018 yılları tıbbi atıklarının nüfus ile ilişkilendirilmesi ve mevcut bertaraf yöntemlerinin incelenmesi.
- [34] Eşmen, O., Bedük, F., ve Bedük, A. (2015). Yaşanabilir bir dünya için yeşil lojistik: Türkiye ve Dünya uygulama örnekleri.
- [35] Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J. A., ve Van Wassenhove, L. N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European journal of operational research*, 103(1), 1-17.
- [36] GAMS Theory Manual
- [37] Gapp, R., Fisher, R., & Kobayashi, K. (2008). Implementing 5S within a Japanese context: an integrated management system. *Management Decision*, 46(4), 565-579.
- [38] Ginter, P. M., ve Starling, J. M. (1978). Reverse distribution channels for recycling. *California Management Review*, 20(3), 72-82.
- [39] Giuntini, R., ve Andel, T. (1995). Reverse logistics role models: Part 3. *Transportation and Distribution*, 36(4), 97-98.
- [40] Goldsby, T. J., ve Garcia-Dastugue, S. J. (2008). Lean thinking and supply chain management. *Supply Chain Management: Processes, Partnerships, Performance*, Supply Chain Management Institute, Florida. GÖK, MŞ, ve ARICI, 113-124.

- [41] Govindan, K., Nosrati-Abarghoee, S., Nasiri, M. M., & Jolai, F. (2022). Green reverse logistics network design for medical waste management: A circular economy transition through case approach. *Journal of Environmental Management*, 322, 115888.
- [42] Govindan, K., Paam, P., ve Abtahi, A. R. (2016). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological indicators*, 67, 753-768.
- [43] Govindan, K., Soleimani, H., ve Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European journal of operational research*, 240(3), 603-626.
- [44] Guiltinan, J. P., ve Nwokoye, N. G. (1975). Developing distribution channels and systems in the emerging recycling industries. *International Journal of Physical Distribution*, 6(1), 28-38.
- [45] GÜL, Y., İSSİ, M., ve GÜL BAYKALIR, B. (2013). Araştırma Laboratuvarlarında Biyogüvenlik, Zoonotik Hastalıklar ve Tıbbi Atıkların Bertarafı. *Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi*, 8(1), 81-96.
- [46] GÜZEL, D., ve Sena, A. S. A. R. (2017). Tersine lojistik faaliyetleri: Erzincan ve Erzurum illerinde bir uygulama. *Erzincan Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 1-20.
- [47] Hashemi, S. E. (2021). A fuzzy multi-objective optimization model for a sustainable reverse logistics network design of municipal waste-collecting considering the reduction of emissions. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128577.
- [48] Hejrani, S., ve Ko, H. S. (2013). A reverse logistics model for medical waste management. In *IIE Annual Conference. Proceedings* (p. 97). Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE).
- [49] Hooker, J. N. (2010). Formulating good MILP models. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*.
- [50] Homayouni, Z., ve Pishvaei, M. S. (2020). A bi-objective robust optimization model for hazardous hospital waste collection and disposal network design problem. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 1965-1984.
- [51] Hong, J., Zhan, S., Yu, Z., Hong, J., ve Qi, C. (2018). Life-cycle environmental and economic assessment of medical waste treatment. *Journal of Cleaner Production*, 174, 65-73.
- [52] Huang, S., Liu, K., ve Zhang, Z. H. (2023). Column-and-constraint-generation-based approach to a robust reverse logistic network design for bike sharing. *Transportation Research Part B: Methodological*, 173, 90-118.

- [53] Ilgin, M. A., ve Gupta, S. M. (2010). Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *Journal of environmental management*, 91(3), 563-591.
- [54] Islam, M. A. (2019). Emergent environmental pollutants removal using metal oxide nanoparticles. *Cell*, 1818, 482533.
- [55] Joneghani, N. M., Zarrinpoor, N., ve Egtesadifard, M. (2022). A mathematical model for designing a network of sustainable medical waste management under uncertainty. *Computers ve Industrial Engineering*, 171, 108372.
- [56] Kailomsom, P., ve Khompatraporn, C. (2023). A Multi-Objective Optimization Model for Multi-Facility Decisions of Infectious Waste Transshipment and Disposal. *Sustainability*, 15(6), 4808.
- [57] Karaçay, G. (2005). Tersine lojistik: Kavram ve işleyiş. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 14(1), 317-332.
- [58] Kargar, S., Paydar, M. M., ve Safaei, A. S. (2020). A reverse supply chain for medical waste: A case study in Babol healthcare sector. *Waste Management*, 113, 197-209.
- [59] KILIÇ, E., ve YAPRAK, B. (2022). Sürdürülebilir Lojistik Uygulaması Olarak Tersine Lojistik Üzerine Türkiye’de Yapılan Çalışmaların Bibliyometrik Analizi. *Düşünce ve Toplum Sosyal Bilimler Dergisi*, 4(2), 161-176.
- [60] Kilic, H. S., Kalender, Z. T., Solmaz, B., ve Iseri, D. (2023). A two-stage MCDM model for reverse logistics network design of waste batteries in Turkey. *Applied Soft Computing*, 143, 110373.
- [61] Kilinç, M., & Sahinidis, N. V. (2017). State-of-the-art in mixed-integer nonlinear programming. Advances and trends in optimization with engineering applications, MOS-SIAM book series on optimization, 273-292.
- [62] Lai, K. H., ve Wong, C. W. (2012). Green logistics management and performance: Some empirical evidence from Chinese manufacturing exporters. *Omega*, 40(3), 267-282.
- [63] Lee, J., & Leyffer, S. (Eds.). (2011). Mixed integer nonlinear programming (Vol. 154). Springer Science & Business Media.
- [64] Liu, F., Liu, H. Q., Wei, G. X., Zhang, R., Zeng, T. T., Liu, G. S., ve Zhou, J. H. (2018). Characteristics and treatment methods of medical waste incinerator fly ash: A review. *Processes*, 6(10), 173.
- [65] Lojistik Bilimi. Yalın Lojistik. (2021) <https://lojistikbilimi.com/yalin-lojistik/> (erişim tarihi: 31.01.2024)
- [66] Mandy, Z. (2020). Coronavirus leaves China with mountains of medical waste. Retrieved April, 27, 2020.

- [67] Mantzaras, G., ve Voudrias, E. A. (2017). An optimization model for collection, haul, transfer, treatment and disposal of infectious medical waste: Application to a Greek region. *Waste Management*, 69, 518-534.
- [68] Marler, R. T., ve Arora, J. S. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and multidisciplinary optimization*, 41, 853-862.
- [69] Michael, Y. M. A. K., ve Peacock, C. J. (2011, January). Social sustainability: A comparison of case studies in UK, USA and Australia. In *17th Pacific Rim Real Estate Society Conference, Gold Coast* (pp. 16-19).
- [70] Min, H., ve Ko, H. J. (2008). The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers. *International Journal of Production Economics*, 113(1), 176-192.
- [71] Mishra, A. R., Mardani, A., Rani, P., ve Zavadskas, E. K. (2020). A novel EDAS approach on intuitionistic fuzzy set for assessment of health-care waste disposal technology using new parametric divergence measures. *Journal of cleaner Production*, 272, 122807.
- [72] Molano, J. C., Xing, K., Majewski, P., ve Huang, B. (2022). A holistic reverse logistics planning framework for end-of-life PV panel collection system design. *Journal of Environmental Management*, 317, 115331.
- [73] Morelli, J. (2011). Environmental sustainability: A definition for environmental professionals. *Journal of environmental sustainability*, 1(1), 2.
- [74] MÜCEVHER, M. H. (2021). Sürdürülebilir lojistik için üç öncelikli strateji: Yeşil lojistik, tersine lojistik ve yalın lojistik. *Enderun*, 5(1), 39-54.
- [75] Nakiboğlu, G. (2007). Tersine Lojistik: Önemi Ve Dünyadaki Uygulamaları. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9(2), 181-196.
- [76] Nosrati-Abarghoee, S., Sheikhalishahi, M., Nasiri, M. M., ve Gholami-Zanjani, S. M. (2023). Designing reverse logistics network for healthcare waste management considering epidemic disruptions under uncertainty. *Applied Soft Computing*, 142, 110372.
- [77] Özkan, O., Bayın, G., ve Yeşilaydın, G. (2015). Sağlık sektöründe yalın tedarik zinciri yönetimi. *AJIT-e: Academic Journal of Information Technology*, 6(18), 71-94.
- [78] ÖZKÖK, G. A., ve YARDIMCI, İ. (2016). PERAKENDE SEKTÖRÜNDE YEŞİL LOJİSTİK UYGULAMALARI.
- [79] Öz, M. (2011). Lojistikte Yeni Yaklaşımlar, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 1(1): 141-155. (Aktaran: MÜCEVHER, M. H. (2021))

- [80] Patel, G. S. (2006). *A stochastic production cost model for remanufacturing systems*. the University of Texas-Pan American.
- [81] Pavnaskar, S. J., Gershenson, J. K., ve Jambekar, A. B. (2003). Classification scheme for lean manufacturing tools. *International journal of production research*, 41(13), 3075-3090.
- [82] Pishvaei, M. S., Razmi, J., ve Torabi, S. A. (2014). An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty: A case study of medical needle and syringe supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 67, 14-38.
- [83] Qi, P., Wang, Y., ve Lin, X. (2023). Optimization of reverse logistics network for medical waste recycling. *Journal of Data, Information and Management*, 1-18.
- [84] Ramalhinho Dias Lourenço, H., ve Soto, J. P. (2002). A Recoverable Production Planning Model. *UPF Economics and Business Working Paper*, (636).
- [85] Rizan, C., Bhutta, M. F., Reed, M., ve Lillywhite, R. (2021). The carbon footprint of waste streams in a UK hospital. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125446.
- [86] Rogers, D. S., ve Tibben-Lembke, R. S. (1999). Going backwards: reverse logistics trends and practices. (*No Title*).
- [87] Rogers, D. S., ve Tibben-Lembke, R. (2001). An examination of reverse logistics practices. *Journal of business logistics*, 22(2), 129-148.
- [88] Roudbari, E. S., Ghomi, S. F., ve Sajadieh, M. S. (2021). Reverse logistics network design for product reuse, remanufacturing, recycling and refurbishing under uncertainty. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 473-486.
- [89] Sahinidis, N. V. (2019). Mixed-integer nonlinear programming 2018. *Optimization and Engineering*, 20, 301-306.
- [90] Sara, E. L. L. I. A. Z. I. D. I., ve Btissam, D. K. H. I. S. S. I. (2020, October). Optimization of green reverse logistics network Integrating artificial bee colony Algorithm and multi-agent system: case of medical waste. In *2020 5th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)* (pp. 1-8). IEEE.
- [91] Sarkodie, S. A., ve Owusu, P. A. (2021). Global assessment of environment, health and economic impact of the novel coronavirus (COVID-19). *Environment, development and sustainability*, 23(4), 5005-5015.
- [92] Seroka-Stolka, O. (2014). The development of green logistics for implementation sustainable development strategy in companies. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 151, 302-309.
- [93] Shadkam, E. (2022). Cuckoo optimization algorithm in reverse logistics: a network design for COVID-19 waste management. *Waste Management ve Research*, 40(4), 458-469.

- [94] Shi, L. H. (2009, September). A mixed integer linear programming for medical waste reverse logistics network design. In *2009 International Conference on Management Science and Engineering* (pp. 1971-1975). IEEE.
- [95] Shi, L., Fan, H., Gao, P., ve Zhang, H. (2009). Network model and optimization of medical waste reverse logistics by improved genetic algorithm. In *Advances in Computation and Intelligence: 4th International Symposium, ISICA 2009 Huangshi, China, October 23-25, 2009 Proceedings 4* (pp. 40-52). Springer Berlin Heidelberg.
- [96] Singh, N., Ogunseitan, O. A., ve Tang, Y. (2022). Medical waste: Current challenges and future opportunities for sustainable management. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(11), 2000-2022.
- [97] Srinivasan, M. M., ve Mandyam, S. (2012). *Building lean supply chains with the theory of constraints*. New York, NY: McGraw-Hill.
- [98] Stock, J. R. (2001). Reverse logistics in the supply chain. *Revista Transport ve Logistics*, 44, 44-48.
- [99] The European Council (Avrupa Konseyi). (2019, 11 Aralık), The European Green Deal. Erişim Yeri: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2019:640:FIN>, Erişim Tarihi: 12.03.2024
- [100] Torkayesh, A. E., Vandchali, H. R., ve Tirkolae, E. B. (2021). Multi-objective optimization for healthcare waste management network design with sustainability perspective. *Sustainability*, 13(15), 8279.
- [101] Türkiye Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2005/07/20050722-16.htm> (erişim tarihi: 31.01.2024)
- [102] Vivien, F. D. (2008). Sustainable development: An overview of economic proposals. *SAPI EN. S. Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*, (1.2).
- [103] Wang, Y. F., Chen, S. P., Lee, Y. C., ve Tsai, C. T. S. (2013). Developing green management standards for restaurants: An application of green supply chain management. *International journal of Hospitality management*, 34, 263-273.
- [104] Wang, Z., Huang, L., ve He, C. X. (2021). A multi-objective and multi-period optimization model for urban healthcare waste's reverse logistics network design. *Journal of Combinatorial Optimization*, 42, 785-812.
- [105] World Health Organization (WHO) (2017) Safe Management of Wastes from Health-care activities. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/259491/WHO-FWC-WSH-17.05-eng.pdf>. (Erişim tarihi: 31.01.2024)
- [106] World Health Organization (WHO) (2018) Health-care waste. <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste> (erişim tarihi: 31.01.2024)

- [107] Xiu, G., ve Chen, X. (2012). Research on Green Logistics Development at Home and Abroad. *J. Comput.*, 7(11), 2765-2772.
- [108] Yang, C., ve Chen, J. (2020). Robust design for a multi-echelon regional construction and demolition waste reverse logistics network based on decision Maker's conservative attitude. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122909.
- [109] YANGINLAR, G., ve Nurgün, B. A. L. (2019). YALIN YÖNETİM VE YALIN LOJİSTİK KAVRAMLARININ İRDELENMESİ. *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 3(1), 151-161.
- [110] Yılmaz, Ö. G. G. A., & Keser, H. Y. ULUSLARARASI TAŞIMACILIK SEKTÖRÜNÜN ETKİNLİĞİNDE YEŞİL LOJİSTİK.
- [111] Yu, H., Sun, X., Solvang, W. D., ve Zhao, X. (2020). Reverse logistics network design for effective management of medical waste in epidemic outbreaks: Insights from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in Wuhan (China). *International journal of environmental research and public health*, 17(5), 1770.
- [112] YURTKURAN, S. (2021). Çevresel Kuznets eğrisi hipotezinin geçerliliği ve yeşil lojistik: Türkiye örneği. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 24(45), 171-201.
- [113] Zhou, J., Yang, S., Feng, H., ve An, Z. (2023). Multi-echelon sustainable reverse logistics network design with incentive mechanism for eco-packages. *Journal of Cleaner Production*, 430, 139500.
- [114] Zikmund, W. G., ve Stanton, W. J. (1971). Recycling solid wastes: a channels-of-distribution problem. *Journal of marketing*, 35(3), 34-39.

ÖZGEÇMİŞ

Eda ER TUNCER, İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. Lise eğitimini Hayrullah Kefoğlu Anadolu Lisesi'nde 2009 yılında tamamladıktan sonra Bahçeşehir Üniversitesi'nde Endüstri Mühendisliği bölümünden 2014 yılında mezun oldu. Profesyonel kariyerine 2015 yılında Arvato Telekomünikasyon firmasında Süreç İyileştirme Mühendisi olarak başladı ve 2020 yılına kadar bu görevde çalıştı. 2021 yılından itibaren ise Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına devam etmektedir.



EKLER

Ek-A:

Senaryo 2 Yıl 8:

Execution

---- 282 VARIABLE e1.L

[1 1.000

---- 282 VARIABLE e2.L

= [0.000

VARIABLE e3.L

= 1.000

VARIABLE obj1.L

= 2444422.818 Amaç Fonk Değeri 1]

VARIABLE obj2.L

= 2072010.687 Amaç Fonk Değeri 2]

---- 282 VARIABLE B.L Tıbbi atık üreticilerinden (i) st. tesisine (j) gönderilen tıbbi atıklar

1

1 1258.780

2 20.980

3 62.940

4 1258.780

5 2.100

6 83.920

7 41.960

8 167.840

9 629.390

Senaryo 2 Yıl 9:

Execution

---- 292 VARIABLE e1.L

[1 1.000, [2 1.000

---- 292 VARIABLE e2.L

= [1.000

VARIABLE e3.L

= 0.000

VARIABLE obj1.L

= 3380160.455 Amaç Fonk Değeri 1]

VARIABLE obj2.L

= 4537467.219 Amaç Fonk Değeri 2]

---- 292 VARIABLE B.L Tıbbi atık üreticilerinden (i) st. tesisine (j) gönderilen tıbbi atıklar

1

2

1 1762.300

2 29.370

3 88.110

4 1174.300 588.000

5 2.940

6 117.490

7 58.740

8 234.970

9 881.150