



**T.C. İSTANBUL T CARET
ÜNİVERSİTESİ**

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ ARAÇLARIN GERİ KAZANIMI
İÇİN BELİRSİZLİK ALTINDA AĞ TASARIMI**

Duygu ERDOĞAN

**Danışman
Doç. Dr. Berk AYVAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İSTANBUL - 2020**

KABUL VE ONAY SAYFASI

Duygu ERDOĞAN tarafından hazırlanan "**Ömrünü Tamamlamış Araçların Geri Kazanımı İçin Belirsizlik Altında Ağ Tasarımı**" adlı tez çalışması 15/05/2020 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde başarı ile savunularak, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman **Doç. Dr. Berk AYVAZ**
İstanbul Ticaret Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Sibkat KAÇTOĞLU**
İstanbul Ticaret Üniversitesi

Jüri Üyesi **Doç. Dr. Nezir AYDIN**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Onay Tarihi : 18.06.2020

İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünün 18.06.2020 tarih ve 2020/286 numaralı Yönetim Kurulu Kararının 5. maddesi gereğince, ders yüklerini ve tez yükümlülüğünü yerine getirdiği belirlenen "Duygu ERDOĞAN" (TC:27559843216) adlı öğrencinin mezun olmasına oy birliği ile karar verilmiştir.

Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK
Enstitü Müdürü

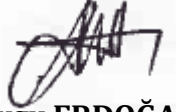
AKADEMİK VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

18/06/2020



Duygu ERDOĞAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER.....	vi
ÇİZELGELER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
2.1. Ömrünü Tamamlamış Araçlar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	4
2.2. kastik Programlama ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	7
2.3. gramlama ile İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	10
3. TERSİNE LOJİSTİK KAVRAMI.....	11
3.1. rsine Lojistik Tanımı ve Kapsamı	11
3.2 Tersine Lojistiğin Önemi	12
3.3. İleri Lojistik ile Tersine Lojistik Arasındaki Farklar	13
3.4. Tersine Lojistikte Faaliyetler.....	14
3.5. Tersine Lojistikte Unsurlar.....	15
3.6. rsine Lojistikte Ürün Geri Dönüşleri	17
3.7. rsine Lojistik Ağlarının Sınıflandırılması	20
3.8. rsine Lojistik Ağ Tasarımı	21
4. METODOLOJİ	22
4.1. tokastik Programlama	22
4.1.1. tokastik programlamada temel kavramlar	22
4.1.2. kastik programlamada kararlar ve aşamalar	23
4.1.3. İki aşamalı stokastik programlama.....	24
4.2. Robust Optimizasyon	25
4.2.1. me tabanlı robust optimizasyon modelleri.....	27
4.2.2. yo tabanlı robust optimizasyon modelleri	35
4.3. Box-Jenkins ile modelleme	38
5. TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIMI İÇİN ÖNERİLEN MODELİN TANIMI VE FORMÜLASYONU	41
5.1. Önerilen Modelin Tanımı.....	42
5.2. delin Formülasyonu ve Varsayımları.....	43
5.2.1. delin formülasyonu.....	43
5.2.2. delin varsayımları	43
5.3. Model 1'in Formülasyonu: Deterministik Programlama	44
5.4. del 2'nin Formülasyonu: Stokastik Programlama	48
5.5. del 3'ün Formülasyonu: Robust Programlama	52
5.6. Örnek Uygulama.....	53
5.6.1. İki aşamalı stokastik programlama modeli	54
5.6.2. Robust programlama modeli.....	58
6. UYGULAMA.....	60
6.1. Ömrünü Tamamlamış Araçlar İçin Geliştirilen Modelin Yapısı ve Uygulamada Kullanılacak Veriler	60

6.2. Box-Jenkins ile Modelleme	64
6.3. Ağın Deterministik Programlama ile Tasarımı ve Sonuçları	66
6.4. Ağın İki Aşamalı Stokastik Programlama ile Tasarımı ve Sonuçları	69
6.5. Ağın Robust Programlama ile Tasarımı ve Sonuçları	72
6.5.1. 2020 yılı için ağın robust programlama ile tasarımı ve sonuçları	73
6.5.2. 2021 yılı için ağın robust programlama ile tasarımı ve sonuçları	75
6.5.3. 2022 yılı için ağın robust programlama ile tasarımı ve sonuçları	77
6.5.4. 2023 yılı için ağın robust programlama ile tasarımı ve sonuçları	79
6.5.5. 2024 yılı için ağın robust programlama ile tasarımı ve sonuçları	81
6.6. Modellerin Karşılaştırılması	83
6.7. Duyarlılık Analizleri	85
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR	95
EKLER	100
Ek A Deterministik modele ilave edilen 2021 yılı ömrünü tamamlamış araç sayıları	100
Ek B Deterministik modele ilave edilen 2022 yılı ömrünü tamamlamış araç sayıları	101
Ek C Deterministik modele ilave edilen 2023 yılı ömrünü tamamlamış araç sayıları	102
Ek D Deterministik modele ilave edilen 2024 yılı ömrünü tamamlamış araç sayıları	103
ÖZGEÇMİŞ	104

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ ARAÇLARIN GERİ KAZANIMI İÇİN BELİRSİZLİK ALTINDA AĞ TASARIMI

Duygu ERDOĞAN

**İstanbul Ticaret Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Berk AYVAZ

2020, 92 sayfa

Son yıllarda yaşanan nüfus artışı doğal kaynakların büyük ölçüde azalmasına yol açmıştır. Hızla azalan doğal kaynakların yenilenebilmesinin mümkün olmadığı bu zamanda, en ufak bir ürünün geri kazanımının çevresel faydası çok fazladır. Ömrünü tamamlamış araçlar çevresel faydasının yanı sıra, içerdikleri geri dönüştürülebilir ve geri kazanılabilir malzemeler nedeniyle ekonomik faydasıyla da dikkat çeken önemli kaynaklardır.

Bu çalışmada ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü için deterministik, iki aşamalı stokastik programlama ve robust programlama modeli geliştirilmiştir. İlk aşamada tüm parametrelerin belirli olduğu varsayılarak deterministik model oluşturulmuş daha sonra modele miktar belirsizliği eklenerek iki aşamalı stokastik programlama modeli geliştirilmiştir. İki aşamalı stokastik programlama modelinin birinci ve ikinci aşamalarında sırasıyla yetkili sökülüm tesislerinin açılma kararları ve tesisler arasındaki akış miktarları kararları alınmıştır. Son olarak ise modelin robust programlama yaklaşımı ile tasarımı yapılmıştır.

Öncelikle önerilen modellerin güvenilirliğini test etmek için küçük bir örnek üzerinde uygulaması yapılmıştır. Modellerin güvenilirliği test edildikten sonra geliştirilen tersine lojistik ağın uygulaması Türkiye’de ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü için uygulanmıştır. Sonuçlar oluşturulan robust programlama modelinin belirsizlikle başa çıkmada daha etkili sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İki aşamalı stokastik programlama, ömrünü tamamlamış araçlar, robust optimizasyon, tersine lojistik ağ tasarımı.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

NETWORK DESIGN UNDER UNCERTAINTY FOR THE RECOVERY OF END-OF-LIFE VEHICLES

Duygu ERDOĞAN

**İstanbul Commerce University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Industrial Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Berk AYVAZ

2020, 92 sayfa

In recent years the increase in population had led to a significant decrease in natural resources. At a time when it was impossible to regeneration rapidly decreasing natural resources, the environmental benefit of recovering the smallest product is enormous. End of life vehicles as well as environmental benefits, important sources with their economic benefits due to the recyclable and attainable materials they contain.

In this study, deterministic, two stage stochastic programming and robust programming model have been developed for the recycling of end of life vehicles. In the first stage, a deterministic model was created by assuming that all parameters were specific, and then a two-stage stochastic programming model was developed by adding quantity uncertainty to the model. In the first and second stages of the two-stage stochastic programming model, the decisions of opening the authorized dismantling facilities and the flow quantities between the facilities were taken respectively. Finally, the model was designed with robust programming approach.

First of all, the proposed models were applied on a small sample to test the reliability. The application of the reverse logistics network developed after testing the reliability of the models was applied for the recycling of end-of-life vehicles in Turkey. It was observed that robust programming model produced more effective results in coping with uncertainty.

Keywords: End of life vehicle, reverse logistics network design, robust optimization, two stage stochastic programming.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Doç. Dr. Berk AYVAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmanın yürütülmesinde yardımlarını gördüğüm Doç. Dr. Nezir AYDIN hocama teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Duygu ERDOĞAN
İSTANBUL, 2020

ŞEKİLLER

	Sayfa
Şekil 3.1. İleri lojistik ve tersine lojistik akışı	13
Şekil 3.2. Tersine lojistik geri kazanım.....	14
Şekil 3.3. Tersine lojistik akışları.....	18
Şekil 4.1. Kutu belirsizlik kümesi	28
Şekil 4.2. Elipsoid belirsizlik kümesi.....	29
Şekil 4.3. Polihedral (çok yüzlü) belirsizlik kümesi	29
Şekil 4.4. Kutu + elipsoid belirsizlik kümesi	30
Şekil 4.5. Kutu + polihedral belirsizlik kümesi	31
Şekil 5.1. ÖTA geri kazanım süreci akış şeması	41
Şekil 5.2. ÖTA geri kazanım süreci.....	42
Şekil 5.3. Örnek uygulama için tasarlanan ağ.....	53
Şekil 6.1. ÖTA geri dönüşüm tersine lojistik ağ yapısı.....	60
Şekil 6.2. Trafikten kaydı silinen araç sayısı	62
Şekil 6.3. Modele dahil edilen veriler	63
Şekil 6.4. Modele dahil edilen veri seti.....	65
Şekil 6.5. Açılan bertaraf tesisi	69
Şekil 6.6. Stokastik programlama açılan bertaraf tesisi	70
Şekil 6.7. Maliyetler	72
Şekil 6.8. 2020 yılı senaryolara göre toplam maliyet	75
Şekil 6.9. 2021 yılı senaryolara göre toplam maliyet	77
Şekil 6.10. 2022 yılı senaryolara göre toplam maliyet	79
Şekil 6.11. 2023 yılı senaryolara göre toplam maliyet	81
Şekil 6.12. 2024 yılı senaryolara göre toplam maliyet	83
Şekil 6.13. Senaryoların karşılaştırılması	85
Şekil 6.14. 2020 yılı için duyarlılık analizi	86
Şekil 6.15. 2021 yılı için duyarlılık analizi	88
Şekil 6.16. 2022 yılı için duyarlılık analizi	89
Şekil 6.17. 2023 yılı için duyarlılık analizi	90
Şekil 6.18. 2024 yılı için duyarlılık analizi	91

ÇİZELGELER

	Sayfa
Çizelge 3.1. Tersine lojistik unsurları	12
Çizelge 3.2. Doğrudan/Dolaylı kazanımlar	16
Çizelge 3.3. Tersine lojistik akışları	19
Çizelge 5.1. İndisler	44
Çizelge 5.2. Parametreler	44
Çizelge 5.3. Değişkenler	45
Çizelge 5.4. Modele ilave edilen indisler	48
Çizelge 5.5. Modele ilave edilen parametreler	48
Çizelge 5.6. Modele ilave edilen değişkenler	48
Çizelge 5.7. Toplama merkezleri ile söküm tesisleri arasındaki uzaklık	55
Çizelge 5.8. Tesisler arası taşıma maliyetleri	55
Çizelge 5.9. Senaryolara göre toplanan ürün miktarı	55
Çizelge 5.10. Söküm tesisleri açılış maliyetleri	56
Çizelge 5.11. Hesaplanan taşıma maliyetleri	56
Çizelge 5.12. Karar değişkenleri değerleri	57
Çizelge 5.13. Hesaplanan amaç fonksiyonu değerleri	58
Çizelge 5.14. Optimal $\diamond$ değerleri	58
Çizelge 5.15. $\diamond$ $\diamond$ değerleri	59
Çizelge 6.1. 2013-2018 yılları arasında trafiğe kayıtlı araç sayıları	61
Çizelge 6.2. 2013-2018 yılları arasında trafikten kaydı silinen araç sayıları	61
Çizelge 6.3. Modele dahil edilen veriler	62
Çizelge 6.4. Tesis kapasiteleri	63
Çizelge 6.5. Malzeme miktarları	63
Çizelge 6.6. Maliyetler	64
Çizelge 6.7. ÖTA bileşimi	64
Çizelge 6.8. Modele dahil edilen veri seti	65
Çizelge 6.9. Schwarz Criterion değerleri	66
Çizelge 6.10. 2020-2024 tahmin veri seti	66
Çizelge 6.11. 2020 yılı kaydı silinen araç sayıları	67
Çizelge 6.12. Deterministik programlama modeli sonuçları	68
Çizelge 6.13. Deterministik programlama açılan tesisler	68
Çizelge 6.14. İki aşamalı stokastik programlama modeli sonuçları	69
Çizelge 6.15. Üç aşamalı stokastik programlama açılan tesisler	70
Çizelge 6.16. Maliyet kalemleri	71
Çizelge 6.17. Q^* değerleri	73
Çizelge 6.18. 2020 yılı maliyetleri	74
Çizelge 6.19. 2021 yılı maliyetleri	76
Çizelge 6.20. 2022 yılı maliyetleri veri seti	78
Çizelge 6.21. 2023 yılı maliyetleri	80
Çizelge 6.22. 2024 yılı maliyetleri	82
Çizelge 6.23. Modellerin karşılaştırılması	83
Çizelge 6.24. 2020 yılı için duyarlılık analizi	85
Çizelge 6.25. 2021 yılı için duyarlılık analizi	87
Çizelge 6.26. 2022 yılı için duyarlılık analizi	88
Çizelge 6.27. 2023 yılı için duyarlılık analizi	90
Çizelge 6.28. 2024 yılı için duyarlılık analizi	91

SİMGELER VE KISALTMALAR

AB	Avrupa Birliği
GAMS	General Algebraic Modeling System
ÖTA	Ömrünü Tamamlamış Araç

1. GİRİŞ

İşletmeler, ürettikleri ürünleri geri alarak tesislerine ya da depolarına taşımakla yükümlüdürler. Bundan dolayı sadece ileri yönlü lojistik ağı yeterli olmamaktadır(Fleischmann vd., 2001).

Bunun yanı sıra ekonomik ve çevresel nedenler, yasalar ve sosyal sorumluluklar gibi nedenlerden dolayı sistemlerine tersine lojistik faaliyetlerini dahil etmek zorundadırlar(Dowlatsahi, 2005).

Dünyadaki en büyük endüstrilerinden biri olan otomotiv endüstrisi, ömrünü tamamlamış araçların geri kazanımı, geri dönüşümü ve yeniden kullanımı ile ilgili yasalar ve sürdürülebilirliği ile ilgili konular sebebiyle büyük ölçüde etkilenen endüstrilerden biridir(Chen vd., 2012).

Avrupa Birliği Komisyonunun ömrünü tamamlamış araçların geri kazanımına yönelik 2000/53/EC sayılı yönetmelik 2000 yılında çıkmış olup 2002 yılından itibaren uygulanmaya konulmuştur. Söz konusu yönetmelikte 2015 yılından itibaren geri dönüşüm ve yeniden kullanım oranının %85, geri kazanım ve yeniden kullanım oranının ise %95 olması hedeflenmiştir. Ülkemizde ise Çevre ve Orman Bakanlığı'nın ömrünü tamamlamış araçların kontrolü hakkındaki yönetmelik 2009 yılında 27448 sayılı resmi gazetede yayınlanmış ve bu yönetmelik 2011 yılında yürürlüğe girmiştir.

Bu yönetmeliğin amacı, çevre ve insan sağlığının korunması için araçlardan kaynaklanan atıkların oluşumunu engellemek, ömrünü tamamlamış araçlar ve bunlara ait parçaların yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım işlemleri ile bertaraf edilecek atık miktarını azaltmak, ekonomik operatörlerin ve geçici depolama alanlarının tabi olacakları standartları ve yükümlülükleri belirlemektir(Çevre ve Orman Bakanlığı, 2009).

Bu çalışmanın literatüre katkısı şu şekildedir; bugüne kadar deterministik olarak çözülmüş tersine lojistik ağ tasarımı problemleri için bir bakış açısı geliştirmek ve bazı belirsiz parametreleri stokastik modele dahil etmeye çalışmaktır.

Bir diğerk konu ise birçok ağ sistemleri için öneriler içermektedir. Bunun sebebi önerilen modelin uygulanabilirliğini göstermektir. Ek olarak, önerilen tersine lojistik ağı için farklı iki yöntem olan iki aşamalı stokastik programlama ve robust programlama yöntemleri kullanarak, bu yöntemlerin karşılaştırmaları yapılmış ve sonuçlara yer verilmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı; daha önce yapılmış olan tersine lojistik ağ tasarımı çalışmalarında uygulanmış olan matematiksel modellerin incelenmesi ve mevcut olan modellerin belirsizlik ortamında eksik noktalarını güçlendirecek bir model sunulmasıdır.

Bu tez kapsamında Türkiye’de ömrünü tamamlamış araçların toplanması, taşınması, sökülmesi, yeniden işlenmesi, geri dönüşüm tesislerine ve bertaraf tesislerine gönderilmesi için gerekli olan tersine lojistik ağ tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada 2012-2019 yılları arasındaki trafikten kaydı silinen araçların verileri baz alınarak 2020-2024 yılları arası TA tahmini ARİMA modeli kullanarak yapılmıştır. Gerçekleştirilen ağın minimum maliyetle tasarımının sağlanması için ilk olarak ağdaki tüm verilerin belirli olduğu kabul edilerek ağ karma tam sayılı doğrusal programlama metodu kullanarak geliştirilmiştir. İkinci olarak modele miktar belirsizliği eklenerek iki aşamalı stokastik programlama modeline ve üçüncü olarak ise robust programlama modeline dnştrlmştir. Tez kapsamındaki her bir model GAMS 23.5.1 ile çözüme kavuşturulmuştur.

Tezin ikinci bölümünde tersine lojistik kavramının tanımı ve kapsamı, önemi, uygulama sebepleri, faaliyetleri ve karar aşamaları ayrı ayrı konu başlıkları altında ele alınarak açıklanmıştır. nc blmde ömrünü tamamlamış araçlar, stokastik programlama ve robust optimizasyon için yapılmış tersine lojistik ağ tasarımı çalışmaları özetlenmiştir.

Dördüncü blmde kullanılan çözüm nerileri ayrıntılı olarak anlatılmış olup beşinci blmde konuya ilişkin tersine lojistik ağı işleyişi, modellerin formülasyonu ve küçük bir örneğe yer verilmiştir.

Altıncı bölümde ise ömrünü tamamlamış araçların tersine lojistik ağ sistemi için üç ayrı model oluşturulup örnek problem için çözümleri ve çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Çalışma yedinci bölümde yer alan, sonuçların değerlendirilmesi ve öneriler ile son bulmaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Ömrünü Tamamlamış Araçlar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Literatürde ağ tasarımı ile ilgili pek çok çalışma yer almasına rağmen, bunların sadece bir kısmı ömrünü tamamlamış örnek bir ürünü temel almıştır. Ömrünü tamamlamış halılar, beyaz eşyalar, pil, lastikler gibi farklı ürün grupları için yapılan ağ tasarımı çalışmaları bulunmakla birlikte, ömrünü tamamlamış ürün olan ÖTA'larla ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma yer almaktadır.

Schultmann vd. (2004 ve 2006), Almanya'da ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü için kapalı döngü tedarik zinciri modeli önermişlerdir. ÖTA'ların geri dönüştürülmesi sırasında elde edilen termoplastik parçalarının toplanması ve yeniden işlenmesi ile geri dönüşüm alanlarının planı birleştirilmiş, çalışmanın optimum çözüme kavuşturulması için bir depo içerisinde simetrik güzergâhlı araç yönlendirme planlamasında bulunmuşlardır.

Choi vd. (2005), ÖTA'ların toplu geri dönüşüm işlemlerinin karlılığını ve verimliliğini arttırmaya yönelik yaptıkları çalışmada karma tam sayılı doğrusal programlama modeli önermişler ve Indiana'daki Capitol City Metals imha tesisinde gözlemlenen gerçek bir geri dönüşüm problemi üzerine uygulamışlardır.

Mansour ve Zarei (2008), ÖTA'ların geri dönüşümü için açık döngü tedarik zinciri olarak tasarlanan ağın kurulum ve taşıma maliyetlerini en küçükleme amacıyla karma tam sayılı doğrusal programlamaya göre modellenmiştir. Küme içerisinde; modellerin karmaşıklığı ve değişken sayısı gibi nedenlerden dolayı genetik algoritma yöntemi kullanılmıştır.

Cruz-Rivera ve Ertel (2009), Meksika'da ÖTA'lar için kapalı döngü tedarik zinciri olarak tasarlanan ağın kurulum maliyetlerini ve aynı zamanda ilgili nakliye maliyetlerini en aza indiren matematiksel model geliştirilmişlerdir. Ağ tasarımı kapasite kısıtsız tesis konumu problemi modeli önermişlerdir.

Xiaolong vd. (2009), Çin'de ömrünü tamamlamış araçlar için tersine lojistik ağ modeli oluşturmuşlardır. Modele göre, çeşitli tesislerin sayıları, konumları ve kapasiteleri ile şebekede ilgili ürünlerin akışı tahsis edilmiştir. Lingo yazılımı sayesinde otomobil ters lojistik ağının konum seçimi sorunu çözülmüş ve modelin etkinliği bir örnekle doğrulanmıştır.

Mansour vd. (2010), ömrünü tamamlamış araçlar için geri dönüşüm ağı tasarlamışlardır. Daha sonra ağ kurulum maliyetlerini ve aynı zamanda ilgili nakliye maliyetlerini en aza indiren bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelin karmaşıklığı nedeniyle genetik algoritmaya dayanan bir çözüm metodolojisi önerilmiştir.

Harraz ve Galal (2011), yaptıkları çalışmada; Mısır'da ÖTA'lar için sürdürülebilir bir geri dönüşüm ağı tasarlamışlardır. Karma tam sayılı programlama yaklaşımı sorunu modellemek için önerilmiştir. LINGO, önerilen modeli çözmek için kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, geri dönüşüm ağının tasarımı ve ömrünü tamamlamış araçların mevzuatı hakkında bilgi elde etmek için analiz edilmiştir.

Merkisz-Guranowska (2011a), ÖTA'ların sökülmesi ve uygun şekilde kurtarılması amacıyla geri dönüşüm şebekesinin tasarımı ile ilgili konular ele alınmıştır. Ağ kurulum maliyetlerini ve aynı zamanda ilgili nakliye maliyetlerini en aza indiren bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelin karmaşıklığı nedeniyle genetik algoritmaya dayanan bir çözüm metodolojisi önerilmiştir.

Merkisz-Guranowska (2011b), ÖTA'lar için geri dönüşüm tesislerinin yerini optimize etmek olan bir karar destek modeli örneği sunulmuştur. Araştırma problemi, ana tesislerin (geri dönüşüm istasyonları, sökücüler ve endüstriyel öğütücüler) özelliklerinin ve farklı paydaşlar tarafından belirlenen ihtiyaçların belirlenmesine dayalı olarak formüle edilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak maliyetlerin minimizasyonu kabul edilmiştir.

Mahmoudzadeh vd. (2011), yaptıkları çalışmada ömrünü tamamlamış araçlar için bir ters lojistik ağı tasarlanmaktadır. Önerilen ağ, ağın toplam maliyetlerinin

en aza indirilmesini amaçlayan üçüncü taraf sağlayıcı perspektifinden modellenmiştir. Matematiksel model, tam sayılı doğrusal programlama modeli olarak formüle edilmiş bir kapasite kısıtlı tesis yeri problemidir. İran'ın mevcut durumundan alınan sayısal bir örnek, önerilen modelin test edilmesi ve onaylanması için Cplex 6.3 tarafından ele alınıp çözümlenmiş ve toplama merkezlerinin oluşturulması için uygun yerleri ve kapasitelerini belirlemişlerdir.

Simic ve Dimitrijevic (2012), yaptıkları çalışmada ömrünü tamamlamış araç geri dönüşüm tesisleri için bir üretim planlama modeli geliştirmişler ve daha sonra gerçek veriler kullanılarak kapsamlı bir şekilde test edilmiştir. Önerilen model test analizinin sağladığı cevaplara dayanarak, VRP dönüşümünün sadece gerekli değil, ÖTA Direktifinin nihai başarısının da yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Golebiewski (2013) ömrünü tamamlamış araçlar için kapalı döngü ters lojistik ağının önemli bir parçasını oluşturmak için kullanılabilecek bir modelleme yaklaşımı sunmaktadır. Ağ içerisinde yer alan elemanların yerlerini belirleyecek optimal modelin geliştirilmeye çalışıldığı ve modelin yüksek karmaşıklığı nedeniyle çözümünde genetik algoritma kullanılmıştır. Önerilen modelleme yaklaşımı, Polonya'daki Mazovia eyaletinde uygulanmıştır.

Simic ve Dimitrijevic (2015) yaptıkları çalışmada ömrünü tamamlamış araçlar için matematiksel bir model geliştirmişlerdir ve önerilen modelin potansiyellerini ve uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Model sonuçları araç geri dönüşüm fabrikalarının optimal uzun vadeli üretim stratejileri oluşturulmasında ve belirsiz durumların riskinin azaltılması açısından önemli olduğu gösterilmiştir.

Ene ve Öztürk (2015) ömrünü tamamlamış araçlar için karma tam sayılı, çok amaçlı bir matematiksel model geliştirerek toplam karı maksimize etmeyi ve ömrünü tamamlamış araçların çevresel etkisini minimize etmeyi hedeflemişlerdir.

Bu çalışma, doğru bir modelle, bu faaliyetlerin çevreyi korumaya ek olarak ekonomik faydalar ve teşvikler sağlayabileceğini göstermektedir.

Phuc vd. (2016), ömrünü tamamlamış araçlar için tersine lojistik ağ tasarımı tüm ağın toplam maliyetini minimum yapan bir model ile çözümlemeye çalışmışlardır. Modelde yer alan bazı parametrelerin belirsiz olması nedeniyle çalışmalarında bulanık doğrusal programlama ile olası karışık tam sayılı doğrusal programlama yöntemini bir arada kullanmışlardır.

Srinivasan ve Khan (2016), ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü için çok dönemli, çok ürünlü ve çok kademeli kapalı döngü yeşil tedarik zinciri ağı üzerine çalışmışlardır. Ağ için iki-amaçlı (maliyet ve emisyon) karma tam sayılı doğrusal programlama modeli oluşturulmuş ve hedef programlama yaklaşımı kullanılarak optimize edilmiştir. Sonuçlar tartışılmış ve modelin bazı yönetim anlayışlarını göstermek için duyarlılık analizi yapılmıştır.

Demirel (2017), ÖTA geri kazanım hedeflerinin ÖTA geri dönüşüm ağ yapısına olan etkilerinin analiz edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, yükseltilmiş hedeflerin sağlanması için ileri işleme teknolojilerini de içeren genel bir ÖTA geri dönüşüm ağı tasarlanmış ve karma tam sayılı programlama modeli formüle edilmiştir. Geliştirilen model, Türkiye örneği için çözülmüş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

2.2. Stokastik Programlama ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Listeş (2002) kapalı döngü ağ tasarımı için hem tedarik hem de geri dönüş kanallarını içeren genel bir stokastik programlama modeli önermektedir. Modelde talep ve geri dönen ürün miktarı gibi tasarım parametrelerindeki belirsizlik belirli sayıdaki senaryolarla ifade edilmiştir. Önerilen modelin çözümü için L-shaped tekniği kullanılmıştır.

Maqsood ve Huang (2003) çalışmalarında açık döngü tersine lojistik ağı için iki aşamalı stokastik programlama modeli önermektedir. Oluşturulan model katı

atık geri dönüşümü için uygulanmıştır. Modelde katı atık yönetim sistemlerinin belirsizliği parametresindeki belirsizlik beş adet senaryo ile ifade edilmiştir.

Salema vd. (2007), tersine lojistik ağ tasarımı için önerilen model Fleischmann vd. (2001) tarafından önerilen modele dayanmaktadır. Modelde belirsiz parametre hem talep hem de getiriler olduğu varsayılarak minimum maliyet amaçlanmıştır. Fabrika, depo veya dağıtım merkezi gibi tesislerin toplam üretim ve toplam depolama kapasitesine kısıtlamalar getirilmiştir.

Listeş (2007), çalışmasında tek ürünli ve kapasite kısıtları altında iki aşamalı stokastik programlama modeli önermiştir. Önerilen modelde talep ve geri dönen ürün miktarı parametreleri belirsiz olarak kabul edilerek belirsizlik çok sayıda senaryo ile ifade edilmiştir. Önerilen modelin çözümü için L-shaped tekniği kullanılmıştır.

Chouinard vd. (2008), çalışmalarında talep miktarı, geri kazanım ve yeniden işleme belirsizlikleri altında iki aşamalı stokastik programlama modeli önermiştir. Önerilen model çok ürünli, kapasite kısıtlı ve kapalı döngü olarak tasarlanıp çözüm için örneklem ortalama tahmini şeması kullanılmıştır.

Francas ve Minner (2009), çalışmalarında talep miktarı ve geri dönen ürün miktarı parametrelerinin belirsizliği kapalı döngü iki aşamalı iki adet stokastik programlama modeli önermişlerdir. Önerilen modelin ilkinde üretim ve yeniden işleme aynı tesiste yapıldığı ikincide ise farklı tesislerde yapıldığı kabul edilmiştir.

Fonseca vd. (2010), çalışmalarında çok kademeli, çok ürünli tersine lojistik ağı için nakliye maliyetleri ve atık miktarı belirsizliği için iki aşamalı stokastik programlama modeli geliştirmişlerdir. Önerilen modelde, tesislerin neden olduğu zararlı etkileri en aza indirmenin yanı sıra, ağların kurulması ve işletilme maliyetlerinin minimize edilmesi amaçlanmıştır.

Pishvae vd. (2009), çalışmalarında, ileri ve tersine lojistik ağ tasarımı için iki aşamalı stokastik programlama modeli geliştirilmiştir. Önerilen model deterministik olarak geliştirilmiş ve daha sonra deterministik model talep belirsizliği ve geri dönen ürün miktarı parametrelerinin belirsizliği göz önünde bulundurularak stokastik programlama modeli olarak genişletilmiştir.

Lee vd. (2010), çalışmalarında, belirsizlik altında sürdürülebilir tersine lojistik ağ tasarımı için iki aşamalı stokastik bir programlama modeli geliştirilmiştir. Önerilen modelde talep ve geri gönen ürün miktarları parametreleri belirsiz olarak kabul edilmiş ve bu belirsizlik çok sayıda senaryo ile ifade edilmiştir. Çözüm için ise örnek ortalama yaklaşım şeması kullanılmıştır.

Kara ve Önüt (2010), çalışmalarında atık kağıt geri dönüşümü için iki aşamalı stokastik bir programlama modeli önerilmiştir. Önerilen modelde talep ve geri dönen ürün miktarı parametrelerinin belirsiz olduğu varsayılarak maksimum kar amaçlanmıştır. Stokastik programlama modelinin birinci ve ikinci aşamalarında sırasıyla toplama merkezlerinin ve geri dönüşüm merkezlerinin konumlandırılması ve tesisler arasındaki akış miktarları kararları alınmıştır.

Gomes vd. (2011) çalışmalarında, Salema vd. (2010) tarafından önerilen modeli genişleterek iki aşamalı stokastik programlama modeli geliştirmiştir. Önerilen modelde geri dönen ürünlerin kalitesi parametresi belirsiz kabul edilerek belirsizlik üç adet senaryo ile ifade edilmiştir. Ramezani vd. (2012) çalışmalarında ileri ve tersine lojistik ağı iki aşamalı ve çok amaçlı stokastik programlama modeli önermişlerdir. Önerilen modelde fiyat, geri dönen ürün miktarları, üretim, işleme, toplama ve bertaraf maliyeti belirsiz olarak kabul edilmiş ve bu belirsizlikler senaryolarla ifade edilmiştir. Modelin amaçları sırasıyla, kar maksimizasyonu, müşteriye cevap verme hızı ve kalite maksimizasyonudur.

2.3. Robust Programlama ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Pishvae vd. (2011), çalışmalarında kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı probleminde talep, geri dönen ürün miktarı ve taşıma maliyetleri belirsizliği altında robust optimizasyon modeli önermişlerdir. İlk olarak, kapalı döngü tedarik zinciri ağının tasarlanması için deterministik bir karışık-tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Ardından, önerilen karma-tam sayılı doğrusal programlama modelinden robust model elde edilmiştir. Geliştirilen model farklı senaryolar için deterministik modelle karşılaştırılıp doğruluğu ispatlanmıştır. Hasani vd. (2011) çalışmalarında talep ve satın alma maliyeti belirsizlikleri altında kapalı döngü tedarik zinciri ağ modeli önerilmiştir. Önerilen model, çok dönemli ve çok ürünlü bir robust optimizasyon modeli olarak genişletilmiştir. Önerilen model hem gıda hem de ileri teknoloji elektronik ürün üretim sanayi için uyumlu bir model olduğu doğrulanmıştır. Hatefi ve Jolai (2014), çalışmalarında talep belirsizliği altında ve ek olarak tesis aksaklıklarını da modele dahil eden ileri - geri lojistik ağ tasarımı için iki amaçlı robust optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Modelde Bertsimas ve Sim modeli kullanılmıştır. Önerilen her iki modelde de toplam maliyet minimize etmeye çalışılmıştır. Keyvanshokoo vd. (2016), çalışmalarında üretim, yeniden üretim, dağıtım, toplama ve elden çıkarma merkezlerinin yanı sıra talep, iade ve nakliye maliyeti belirsizliği altındaki perakendecilerden oluşan tek ürünü, çok dönemli ve kapasite kısıtlı kapalı döngü tersine lojistik ağı için robust optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Önerilen modelde belirsizlik için çok yüzlü belirsizlik kümeleri kullanılmış ve toplam karın maksimize edilmesi amaçlanmıştır. Kim vd. (2018), çalışmalarında geri dönen ürün miktarı ve talep belirsizliği altında kapalı döngü tersine lojistik ağı için robust optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Önerilen modelin uygulaması ömrünü tamamlamış kıyafetlerin geri dönüşümü için uygulanmış ve modelde özel koşullar altında kutu belirsizliği kullanılmıştır. Modelde üretim maliyetleri, tedarikçi veya toplayıcı seçimindeki sabit maliyetler, nakliye maliyetleri, fazla üretim için ceza maliyetleri ve stok maliyetlerini göz önünde bulundurularak toplam kar maksimize etmeyi hedeflenmiştir.

3. TERSİNE LOJİSTİK KAVRAMI

3.1. Tersine Lojistik Tanımı ve Kapsamı

Tersine lojistik kavramının ilk tanımını 1981 yılında Lambert ve Stock yapmıştır. Tersine lojistiği tek yöndeki ürün akışının yani ileri lojistik yönetimi akışında ters yönde gitmek olarak tanımlamışlardır. 1980'lerde tersine lojistik, ileri akışın tersi yönünde yani son kullanıcıdan üreticiye doğru olan ürün akışı olarak düşünülmüştür (Rogers ve Tibben-Lembke, 2001).

Amerikan Ters Lojistik Yönetim Konseyi ilk tersine lojistik kavramının tanımını 1990'lı yıllarda yapmıştır. Tanıma göre "tüketim noktasından üretim noktasına kadar hammaddelerin, üretimi bitmiş ürünlerin ve ilgili bilgilerin etkin bir şekilde planlanması, uygulanması ve kontrol etme süreci veya bertaraf edilmesidir" (Rogers ve Tibben-Lembke, 1998).

Dowlathshahi (2000)'ye göre tersine lojistik üreticinin, ürün geri kazanımının, yeniden işleme veya bertarafı için tüketim noktasından gönderilen ürünlerin ya da parçaların kabul edilmesidir. Tersine lojistik, yeniden işleme, geri kazanım, bertarafı için ürünlerin akışını yönetmeyi de içerir.

Fleischmann (2000), tersine lojistiği üç farklı açıdan ele almış ve buna uygun tanımlarda bulunmuştur. Bunlar (Ayvaz, 2013):

1. Tersine lojistik, lojistik sistemlerin büyüyen elemanı olarak görülmektedir. Tedarik zincirleri genel olarak, tek yönlü ve iyi tanımlanmış bir hiyerarşiye sahip bir yapı olarak düşünülmüştür. Ganeshan vd.nin (1998)'de tanımladığı gibi, "Tedarik zinciri; tedarikçi, üretici, distribütör, perakendeci ve müşterilerden oluşur. Malzemeler tedarikçilerden müşterilere doğru ileri yönde akacağı gibi, bilgi akışı iki yönde de olan bir sistemdir." Bununla beraber tersine lojistikte ürün akışının ters yönde olduğu düşünülmektedir. İleri lojistiğin yanı sıra, tersine lojistik de sisteme dahil edilmelidir.

2. Tersine lojistik, kullanım ömrünü tamamlamış ve artık kullanılamayacak hale gelen ürünlerin akışıdır. Kısaca tersine lojistik planlanan veya gerçekleşmiş

kullanım çeşitlerini de içermektedir. Geri dönüşüm ve bertaraf yöntemleri ile elde edilen ürünlerin ekonomik değerini maksimum düzeye çıkarmak en önemli amacıdır.

3. Tersine lojistik daha çok alıcı tarafı ifade etmektedir. Bu yüzden tersine lojistik, tedarik lojistiğinin özel bir boyutudur, denilebilir. Bu durumda tersine lojistik, değer kazanmak ya da uygun şekilde bertaraf edilmesi amacıyla geleneksel ileri lojistiğin yönünün tam aksine kullanılmış ürünlerin ve bu ürünlerin bilgilerinin etkin bir şekilde akışının ve geri toplanan ürünlerin stok planı yapılmasının, bu planın uygulanması ve uygun kontrollerin yapılma sürecidir (Fleischmann, 2000).

“Tüketim noktasından orjin noktasına doğru olan tüm ürün ve bilgi akışlarının yönetimi süreci” olarak tanımlanmış olan tersine lojistik, ürünleri geri toplanmasının ve ürün geri kazanımının sistematik bir şeklidir (Karaçay, 2005). Çizelge 3.1’de tersine lojistik tanımındaki unsurlar toplu halde gösterilmektedir (Karaçay, 2005).

Çizelge 3.1. Tersine lojistik unsurları (Karaçay, 2005)

Nedir?	Girdiler	Etkinlikler	Çıktılar	Nereden?	Nereye?
-Süreçler -Görevler -Yetenek ve etkinlikler	-Atılmış ürünler -Kullanılmış ürünler -Daha önce gönderilmiş ürün ve parçalar -Zararlı ve zararlı olmayan atıktan ürün ve paketler -Hammadde -Bilgi -Süreç içi stoklar -Nihai ürün	-Etkili ve maliyet etkin akışın plânlaması uygulaması ve kontrolü -Toplama -Nakliye -Depolama -İşleme -Kabul -Geri kazanım -Paketleme -Gönderme -Azaltma -Yönetme -Yok etme	-Yeniden kullanılabilen ürünler -Geri dönüşüm -Yeniden üretim -Yok etme -Azaltma -Yönetme -Geri alım değeri	-Tüketim noktası	-Üretici merkezi -Toplama noktaları -Orijin noktası

3.2 Tersine Lojistiğin Önemi

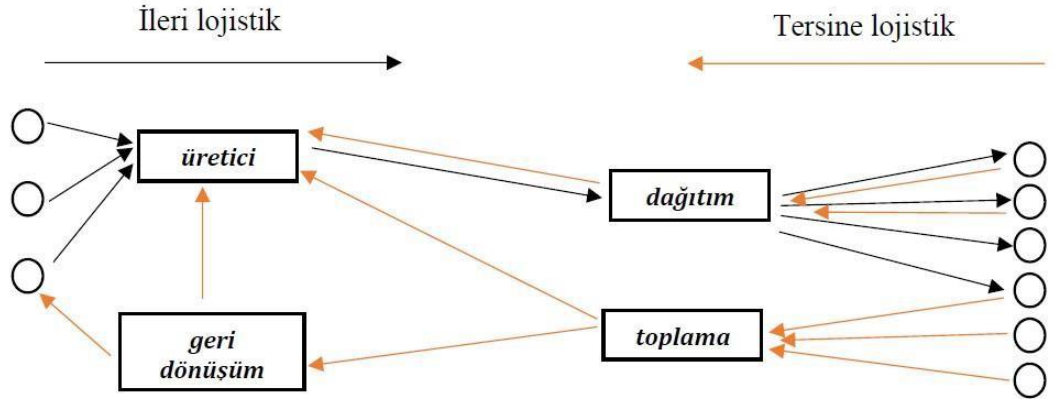
Tersine lojistik faaliyetlerinin kontrolü yoğun rekabet ortamı ve düşük kar ile satış yapıldığında firmalara önemli boyutta yarar sağlar. Firmalar tersine lojistik

yöntemlerini kullanarak %5 ile %10 oranında tasarruf sağlayabilir. Bu tasarruf sayesinde firmaların karı yüksek oranda artar (Goetschalckx vd, 2002). Tersine lojistiğin önemi günümüzde şu sebeplerden dolayı sürekli artış göstermektedir(Taş,2009):

- Geri dönen ürünlerin miktarlarındaki artış
- Ürün geri alımı hakkında çıkan yasalarda artış
- Kullanıcıların tehlikeli atık içeren ürünlerin bertarafı için firmalara yaptıkları baskılar.
- İkincil pazarlarda satış fırsatlarının verilerek tekrar piyasaya sunulmasına imkân verilmesi.
- Gömülecek atıkların kapasitesinin belirli ve bu işlemin yeniden işleme faaliyetlerine göre pahalı olmasıdır.

3.3. İleri Lojistik ile Tersine Lojistik Arasındaki Farklar

İleri lojistik ve tersine lojistikte en önemli hususlardan biri tersine lojistik, ileri lojistiğin simetrik bir yansıması olmayabilir. Şekil 3.1’de ileri lojistik ve tersine lojistiğin en genel haliyle akışı verilmiştir (Fleischmann vd., 1997).



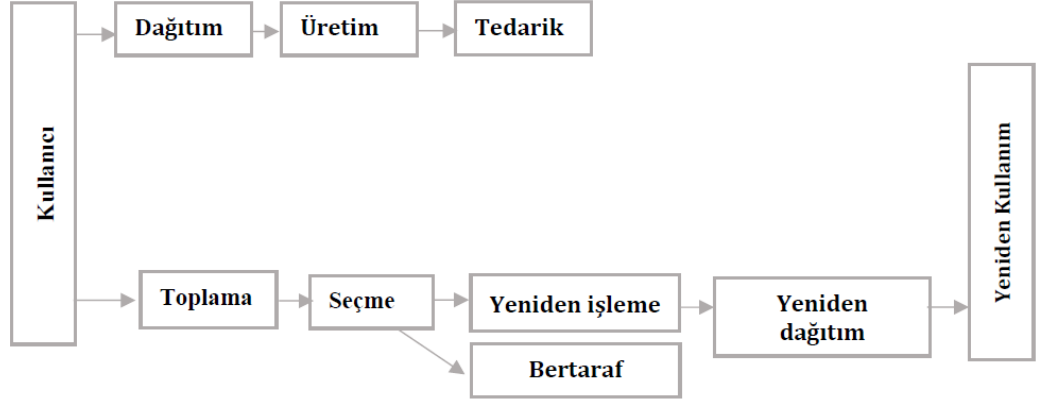
Şekil 3.1. İleri lojistik ve tersine lojistik akışı

İleri lojistikte tahmin etme daha kolayken tersine lojistikte tahmin belirsizdir. İleri lojistikte taşıma birden çoğa doğru iken tersine lojistikte çoktan bire doğrudur. İleri lojistikte ürün rotası bellidir fakat tersine lojistikte rota

değişkenlik gösterebilir. İleri lojistikte pazarlama ve kanal standartlaşmış olmasına rağmen tersine lojistikte standart değildir. İleri lojistikte işletmenin hızı ve düzeni önemli iken tersine lojistikte önemli değildir. İleri lojistikte ürün yaşam döngüsü açıktır. Fakat tersine lojistikte döngü daha karmaşıktır. İleri lojistikte maliyetler belirgindir fakat tersine lojistikte maliyetleri önceden bilmek neredeyse olanaksızdır. İleri lojistikte üretilen her ürün ve ambalaj kalitesi, fiyatı standarttır fakat tersine lojistikte ürün ve ambalaj kalitesi, fiyat farklılık göstermektedir. İleri lojistikte süreç kontrolü tersine lojistiğe göre daha kolaydır. İleri lojistikte stok kontrolü daha kolaydır fakat tersine lojistikte kontrol oldukça zordur. Tedarikçiler ile ilişkiler ileri lojistikte daha belirgindir.

3.4. Tersine Lojistikte Faaliyetler

Tüm tersine lojistik ağlar, adımlar faaliyete göre değişmekle beraber aşağıdaki faaliyetleri içerir. Şekil 3.2 tersine lojistik geri kazanım faaliyetlerini göstermektedir (Fleischmann, 2001).



Şekil 3.2. Tersine lojistik geri kazanım

Toplama: Toplama işlemi kullanılmış olan ürünlerin toplanmasının yanı sıra geri dönüşüm işleminin gerçekleşeceği yere taşınmasını içerir. Toplama satın alma, taşıma ve stokta tutma faaliyetlerini içerir. Ürünlerin toplanmasının nedeni ekonomik nedenlerin yanı sıra yasal zorunluluklar da olabilir(Fleischmann, 2000). Toplama faaliyetleri işletme tarafından ya da üçüncü parti lojistik firmaları aracılığıyla sağlanabilir (Roger ve Tibben-Lembke, 1998).

Kontrol Etme ve Ayıklama: Ürünler toplandıktan ve tesislere taşındıktan sonra toplanan ürünlerin kalitesinin kontrol edilmesi ve ayıklanması gerekir. Kontrol etme, toplanan ürünün yeniden kullanılabilirliğini ve ürün kalitesini belirlemek için yapılan işlemlerdir(Srivastava ve Srivastava, 2006). Kontrol ve ayırma işlemi kısaca, toplanan ürünlerin ne yapılacağına ve hangi ürünlerin geri kazanılacağına karar verilmesidir (Chan vd, 2006).

Yeniden işleme: Ürünlerin belirli işlemlerden geçirilerek tekrar kullanılabilecek duruma getirilmesidir. Bu işlemler demontajlama, küçük parçalara ayırma, yenisi ile değiştirme, geri dönüşüm, tamir etme, ürünü yenileştirme veya makyajlama ve yeniden üretim veya yeniden düzeltme işlemleridir (Fleischmann, 2001). Tersine lojistikte yeniden işleme tüm sürecin en yüksek maliyetle gerçekleştirilen aşamasıdır. Yeniden işleme aşaması ve geri dönüşüm işlemlerinin maliyeti oldukça yüksektir (Rakesh vd., 2005).

Bertaraf etme: Bertaraf aşamasında yeniden kullanılamayacak durumda olan ürünler ortadan kaldırılır. Kontrol etme ve ayıklama aşamasında kullanım ömrünü tamamladığı için yeniden kullanılamayacağı tespit edilen ürünler bertaraf edilebilir. Bertaraf etme seçenekleri taşıma, toprağa gömme ve yakmadır (Fleischmann vd., 2000).

Yeniden dağıtım: Yeniden dağıtım geri kazanılmış ürünlerin talep edilen noktalara ulaştırılmasıdır (Chan vd, 2004).

3.5. Tersine Lojistikte Unsurlar

Genel olarak kurumlar, kar elde etmek, yasal zorunluluklar ve çevreye duydukları sorumluluklardan dolayı tersine lojistiğe akışlarına dâhil etmek durumundadırlar (Dekker vd., 2004). Buna bağlı olarak tersine lojistiğe etki eden unsurlar ekonomik nedenler, yasalar ve kurumsal sorumluluk olarak üç ana başlıkta altında toplanmaktadır (Brito ve Dekker, 2004).

Ekonomik nedenler: Tersine lojistik işletmelere hammadde kullanımının azalması ile geri dönüşüme değer katma ve bertaraf etme maliyetlerinde azalma ile doğrudan kâr sağlar. Örneğin hurda metal şirketleri, hurda metalleri toplayıp çelik ile üretim yapan firmalara pazarlarlar ve bu firmalar da kullandıkları hammaddelere hurda metali ilave ederek maliyetlerini düşürmektedirler. Üretilen birçok elektronik ürünlerde ürünler kısa bir süre sonra kullanım ömrünü tamamlar fakat ürünlerin oluşturduğu bileşenler yüksek miktarda ekonomik değere sahiptir (Dekker vd., 2004). Firmalar pazarlama stratejileri ve diğer firmalarla rekabet gibi nedenlerden dolayı akışlarına tersine lojistiği dahil etmelerine rağmen elde ettikleri kazanç çok fazla olmayabilir fakat stratejik olarak edinilen kazanç çok daha fazladır. İleride karşılaşılabilecek yasalarla uyumu kolay hale getirmek için firmalar stratejilerini rahatça belirleyebilirler (Karaçay, 2005). Tersine lojistiği akışlarına dahil eden firmalar etmeyen firmalara göre maliyetlerinde %40-%60 gibi bir azalma sağlarlar ve bu azalma için %20 gibi bir çabaya yeterlidir (Tosun, 2005).

Ekonomik nedenler doğrudan ve dolaylı kazanımlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu kazanımlar çizelge 3.2’de verilmiştir (Dekker vd., 2004).

Çizelge 3.2. Doğrudan/Dolaylı kazanımlar

Doğrudan kazanımlar	Dolaylı kazanımlar
Malzeme girişi	Tahmin edilen/engellenen yasalar
Maliyet düşüşü	Pazarı koruma
Katma değerli geri kazanım	Çevresel imaj
	Gelişmiş müşteri/tedarikçi ilişkisi

Yasalar: Yasalar ile anlaşılması gereken firmaların ürettikleri ürünleri toplamaları, geri dönüştürmeleri ve geri kazanmalarını söyleyen yargılardır (Guide vd., 2000). Yasalar, sorumlu üreticileri toplama ya da ürettikleri ürünlerin geri dönmesi durumunda kabul etme konusunda sorumlu tutarlar. Bu sorumlulukların sayesinde ise toplanan ürünlerin miktarında ve kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerin yeniden kullanımında artış yaşanmaktadır (Brito ve Dekker, 2002).

Kurumsal sorumluluk: Kurumsal sorumluluk üretici firmaların kurumsal değerler ve ilkeleri doğrultusunda tersine lojistik faaliyetlerini akışlarına dahil etmesini sağlar (Dekker vd., 2004).

3.6. Tersine Lojistikte Ürün Geri Dönüşleri

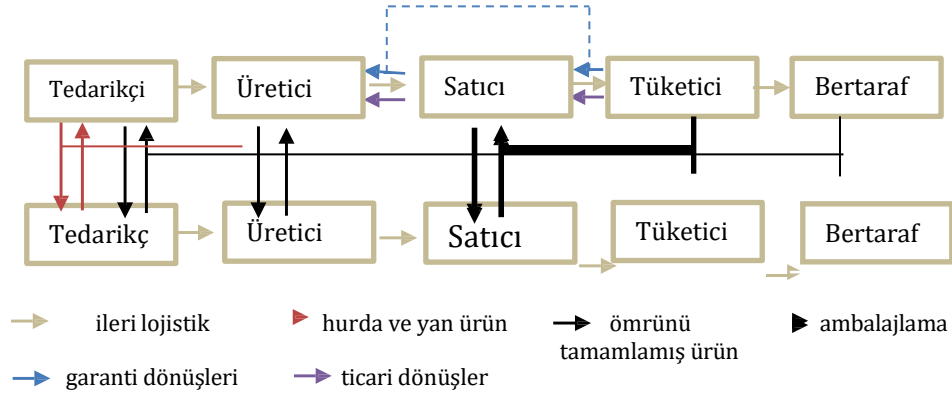
Üretilen ürünler fonksiyonlarını yerine getiremeyecek duruma geldiklerinde ya geri gönderilir ya da atılırlar. Hatalar, ürünlerin taşınması sırasındaki hasarlar, yeni bir model üretilmesi, ürün değişimi, ürün iadesi, tamir, ürün geri çağırımları ürün geri dönüşleri nedenlerindendir (Min vd., 2006).

Geri dönüş oranları tüm endüstrilerde %3 ile %50 arasında değişmektedir. Farklı endüstrilerde geri dönüşlerin %3-5 oranında olduğunu göstermektedir. Örneğin en yüksek geri dönüş oranıyla medya endüstrisi ortalama %50 geri dönüş oranına sahiptir. %20 ile %30 arasında yayınevleri, %18 ile %35 oranında katalog endüstrisi ve %20 ile %30 ile tebrik kartı şirketleri en yüksek geri dönüş oranlarına sahiptir (Daugherty vd., 2004).

Tersine lojistikte geri dönüşler;

- Ömrünü tamamlamış ürün dönüşleri
- Garanti dönüşleri
- Ticari dönüşler
- Hurda ve yan ürün dönüşleri
- Ambalajlama

olarak beş farklı kategoriye ayrılır. Şekil 3.3 bu dönüşleri ve yerlerini göstermektedir (Fleischmann, 2001).



Şekil 3.3. Tersine lojistik akışları (Fleischmann, 2001)

Ömrünü tamamlamış ürün dönüşleri: Ömrünü tamamlamış ürün dönüşleri, ekonomik ya da fiziksel şekilde kullanım ömrü sonlanmış ürünlerdir. Ürünler, ilgili yasalar ile sorumlu üretici tarafından toplanmakta ya da içerdikleri değerli metaryallerden dolayı komisyoncular tarafından geri alınmaktadır (Dekker vd., 2004). Toplanan ürünlerin doğrudan kullanımı çoğu zaman doğru olmayabilir, kullanım ömrünü tamamlayan ürünlerde en iyi iyileştirme yeniden işleme ya da geri dönüşüm faaliyetlerinden biridir.

Ömrünü tamamlamış ürünler içerdikleri değerli malzemelerden dolayı ekonomik bir değere sahiptir. Bu durum hem üreticilerin hem de iyileştirme şirketleri için önemli bir konu haline gelmiştir. Tersine lojistik araştırmaları da ömrünü tamamlamış ürünlerin geri kazanımı ile yakından ilgilenmektedir (Fleischmann, 2001).

Garanti dönüşleri: Üreticiye geri dönen hatalı ürünleri kapsamaktadır. Garanti dönüşlerindeki hatalar, ürün taşınırken veya ürünün kullanımı sırasında ortaya çıkan hatalardır. Bu ürünler için iyileştirme faaliyeti ürünün tamir edilmesidir.

Ticari dönüşler: Sezonluk üretilen ürünler ya da kullanım ömrü kısa olan ürünleri kapsamaktadır. Satıcı bu kategorideki ürünleri ücret iadesi karşılığında üreticiye geri vermektedir. Bu ürünler yeniden kullanılamadığı ve geri dönüştürülemediği için doğrudan ikincil pazara gönderilirler. Ticari dönüşler birbiri ile doğrudan bağlantılı olan kategoriler arasında gerçekleşir ve risk alıcıdan satıcıya doğrudur.

Hurda ve yan ürün dönüşleri: Ürün üretimi sırasında fazla olan malzemelerin tekrar üretime katılmasıdır. Yan ürünler genelde alternatif tedarik zincirine gönderilir. Ürünler tekrar işlendiğinden kalite hedefleri ve kaynak korunduğundan dolayı ekonomik katkısı çok fazladır.

Ambalajlama: Kutular, şişeler ve paletler gibi yeniden kullanımı mümkün olan ürünleri kapsamaktadır. Bu kategorideki ürünler toplandıktan sonra sadece temizleme faaliyetine tabi tutulurlar.

Ekonomik faydası da çok yüksek olan bu ürünlerin geri dönüş süreleri çok kısadır. Atık ambalaj miktarının fazla olması günümüzde de önemli sorunları beraberinde getirmiştir.

Çizelge 3.3. Tersine lojistik akışları (Fleischmann, 2001)

Geri Dönüşler	Çevrim	Yürütücü	İşlemleri	Aktörleri	Örnekleri
Ömrünü tamamlamış ürün dönüşleri	Uzun	-Ekonomik Pazarlama -Yasal düzenleme -Kaynak koruma	-Yeniden üretim -Geri dönüşüm -Elden çıkarma	Orijinal ve alternatif zincir	-Halı geri kazanımı -Lastik geri kazanımı
Garanti dönüşleri	Orta	Pazarlama Yasal düzenleme	Tamir Elden çıkarma	Orijinal zincir	Hatalı ev gereçleri
Ticari Dönüşler	Orta, Kısa	Pazarlama	Yeniden kullanım Yeniden üretim, Geri dönüşüm Elden çıkarma	Orijinal zincir	Bilgisayarlarda oluşan fazla stok Moda olan kıyafet ve kozmetikler
Hurda ve Yan ürün Dönüşleri	Çok kısa	Ekonomik Yasal düzenleme	Yeniden üretim, Geri dönüşüm	Orijinal zincir Alternatif zincir	İlaç endüstrisi Çelik işçiliği
Ambalaj	Kısa	Ekonomik Yasal düzenleme	Yeniden kullanım, Geri dönüşüm	Orijinal zincir Alternatif zincir	Paletler, kartonlar, şişeler

3.7. Tersine Lojistik Ağlarının Sınıflandırılması

Tersine lojistik ağlar,

1. Merkezileşme derecesi
2. Seviye sayısı
3. Diğer ağlarla olan bağlantısı
4. Açık ya da kapalı döngü olması
5. Dalların iş birliği

şeklinde beş farklı kategoriye ayrılabilir (Fleischmann, 2001).

Merkezileşme Derecesi: Ağın genişliği yada yatay entegrasyon seviyesi olarak düşünülebilir. Aynı olan faaliyetlerin gerçekleşme merkezlerinin sayısı olarak ifade edilebilir. Merkezi bir ağda her faaliyet belirli merkezlerde yapılır. Merkezi olmayan bir ağda ise faaliyetler farklı merkezlerde de yapılabilir.

Seviye sayısı: Üretim aşamasında olan ürünün hangi merkezlerde işlem gördüğü ve bu merkezlerin sayısını belirtmekle beraber ağın derinliğini kapsamaktadır. Tüm işlemler tek tip merkezde yürütülürse tek seviyeli ağ, birçok faaliyeti tabi tutulursa çok seviyeli ağ olarak adlandırılır.

Diğer ağlarla olan bağlantısı: Mevcut olan ağ ile yeni ağın ilişki derecesi ifade edilmektedir.

Açık ya da kapalı çevrim olması: Açık çevrimde akış tek yönlü, kapalı çevrimde ise akış çift yönlüdür. İleri ve geri akışların birbiriyle olan ilişkilerinden söz edilir.

Dalların iş birliği: İlgili birimlerin ağ içerisindeki birbiriyle olan ilişkilerini kapsamaktadır.

3.8. rsine Lojistik Ağ Tasarımı

Ürün tipi ve geri kazanımı göz önüne alındığında, dört farklı tersine lojistik ağından söz edilebilir (Demirel ve Gökçen, 2008) :

1. Doğrudan yeniden kullanım ağları: Toplanan ürünler tamir ve yeniden işleme yöntemlerinden herhangi birini gerektirmiyorsa bu ürünler yeniden kullanılabilir. Örneğin paletler, şişeler ve standart konteynerler vb. Doğrudan kullanımda muayene, temizleme ve bakım gerekli olabilir. Bu ürünler, yeni ürüne kıyasla düşük kalitede olsalar da bu durum ürünün performansını etkilemez. Bu ağlar kapalı döngüdür.

2.Yeniden üretim ağları: Geri dönen ürünleri kullanılabilir duruma getirerek yeni ürünlerde kullanılmasıdır. Geri dönen ürünler, kullanılmış, kullanım ömrünü tamamlamış olabilir. Yeniden üretilmiş ürün, yeni ürün ile aynı özellik ve kaliteye sahiptir. Otomobil parçaları, fotokopi makineleri, uçak motor parçaları, beyaz eşya parçaları, bilgisayar parçaları yeniden imal edilen ürünlere örnek olarak verilebilir. Bu ağlar kapalı döngüdür.

3.Tamir servis ağları: Satış sonrası hizmet, hatalı veya bozuk ürünleri tamir etmek için oluşturulan ağlardır. Tamir ağında geri dönen ürünü çalışır ve kullanılabilir duruma getirmek amaçlanmaktadır.

4.Geri dönüşüm ağları: Geri dönüşümde ürün ve bileşenlerin özellik ve işlevleri kaybolur. Geri dönüşüm, kullanılmış ürün ve bileşenleri oluşturan malzemelerin yeniden kullanılabilmesini amaçlamaktadır. Metal, cam, kâğıt vb. üçüncü parti geri dönüşüm servis sağlayıcılar tarafından geri dönüştürülürler.

4. METODOLOJİ

Bu bölümde tez kapsamında kullanılan stokastik programlama yöntemi, robust optimizasyon yöntemi ve Box-Jenkins yöntemi anlatılmıştır.

4.1. Stokastik Programlama

4.1.1. Stokastik programlamada temel kavramlar

Bir modelin, gerçek sistemi mümkün olduğunca iyi temsil etmesi istenir. Matematiksel modellemede sistemin doğru bir şekilde ifade edilebilmesi, varsayımlar, parametre, kısıtlar, karar değişkenleri gibi problem girdi ve çıktılarının kesin ve doğru bir şekilde tanımlanması ile başarılabilir. Ancak, gerçek hayatta bahsedilen bu koşul, durum ve değerlerin kesin olarak belirlenebilmesi neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, her karar verici aslında belirsizlik ortamında hareket etmektedir. Belirsiz parametreler rassal değişken

olarak tanımlanabilir. Belirsizlik, ω ile ifade edilen çıktılarla ifade edilir ve tüm çıktılar kümesi Ω ile ifade edilir. Bu çıktılar belirlenmesi çok önemli değildir, önemli olan bu çıktılar rassal değişkenlere olan etkisidir. Bu çıktılar, olay olarak adlandırılan Ω 'nin altkümesidir. A toplanmış tüm rassal olaylar kümesi

olarak tanımlanır. Her $A \in \mathcal{A}$ olayına, $P(A)$ olasılık değeri atanmıştır ve

$0 \leq P(A) \leq 1$, $P(\emptyset) = 0$, $P(\Omega) = 1$ ve $A_1 \cap A_2 = \emptyset$ ise

$$P(A_1 \cup A_2) = P(A_1) + P(A_2)$$

$(\Omega, \mathcal{A}, P)$, birçok koşul barındıran olasılık uzayı olarak adlandırılır. $\mathcal{A}$ 'daki tüm rassal olaylardan etkilenen birden fazla rassal değişken tanımlamak mümkündür. Stokastik programlamada $\omega \in \Omega$ olan ve ω ile yakından ilişkisi olan rassal değişkenler "senaryo" olarak tanımlanır. Tüm rassal değişkenler

sonlu sayıda birçok senaryoya bağlıdır. Çoğu durumda Ω ve $\mathcal{A}$ 'yı kesin olarak tanımlamak oldukça güçtür. Bu gibi durumlarda rassal değişkenlerle ilgili bilgi sahibi olmak yeterlidir. Herhangi bir rassal ξ değişkeni için birikimli dağılım,

$F(x) = P(\xi \leq x)$ ya da açıkça $F(x) = P(\{\omega | \xi(\omega) \leq x\})$ şeklinde tanımlanmaktadır. $k \in K$

ve $f(\xi) = P(\xi \leq \xi)$ ve $\sum_{\xi} f(\xi) = 1$ olarak tanımlanır. Sürekli olan değişkenler yoğunluk fonksiyonu olan $f(\xi)$ ile tanımlanır. $\xi \in [a, b]$ olmak üzere ξ 'nin olasılık değeri $P(a \leq \xi \leq b) = \int_a^b f(\xi) d\xi$ dir. Burada F birikimli bir dağılımdır. Kesikli durumun tersine, bir $P(\xi = a)$ değerinin olasılığı sürekli bir rassal değişken için her zaman 0 olur. F dağılımında ise $\int_{-\infty}^{\infty} df(\xi) = 1$ 'dir. Beklenen değer rassal bir değişken için kesikli olduğu durumunda $\sum_{\xi} \xi f(\xi)$ olur ve sürekli olduğu durumda ise $\int_{-\infty}^{\infty} \xi df(\xi)$ şeklinde hesaplanmaktadır (Birge ve Louveaux, 1997).

∞

4.1.2. Stokastik programlamada kararlar ve aşamalar

Stokastik programlama genel olarak belirsizlik altında karar vermek için kullanılabilecek matematiksel programlama modellerini kapsayan bir yöntemdir (Wallace ve Ziemba, 2003). Aslında stokastik programlama; belirsizliği modele dahil ettiğinden matematiksel modeller ile karar verme modellerini bir araya getiren bir yaklaşımdır (Bienstock ve Shapiro, 1988). Rassal değişkenlerin olasılıksal tanımının, olasılık dağılımları, yoğunluk fonksiyonları ve olasılık ölçümleri altında yapılabileceği varsayılmaktadır. Çoğu

rassal değişken, rassal deneyler yapılmadan bilinmezler ancak $\xi = \xi(\omega)$ rassal deneyler sonucunda bilinebilmektedir.

Karar kümeleri iki gruba ayrılır:

1. Bazı kararlar rassal deney yapılmadan önce alınır ve bu kararlara birinci aşama değişkenleri ve bu kararların alındığı periyod ise birinci aşama olarak adlandırılır.
2. Bazı kararlar rassal deney yapıldıktan sonra alınır ve bu kararlara ikinci aşama değişkenleri adı verilir bu kararların alındığı periyod ise ikinci aşama olarak adlandırılır.

Birinci aşama kararları x vektörü ile gösterilirken, ikinci aşama kararları $y(\omega, x)$ ya da $y(\omega, x)$ gösterilebilir. Olayların ve kararların sırası $x \rightarrow \xi(\omega) \rightarrow y(\omega, x)$ şeklindedir.

Değişkenlerin birinci aşama yada ikinci aşama değişkeni olması, kararların rassal deneyin öncesinde ya da sonrasında alınmasıyla ilgilidir (Birge ve Louveaux, 1997).

4.1.3. İki aşamalı stokastik programlama

İki aşamalı stokastik programlama problemleri, kararların iki aşamada alındığı ve aralarında bazı rastgele olayların gözlemlendiği durumları ifade eder (Fabian ve Szoke, 2006). 1997 yılında Birge ve Louveaux'ın yapmış oldukları çalışmada iki aşamalı stokastik programlama aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\min_{y, \varepsilon} c^T y + Q(y, \varepsilon) \quad (4.1)$$

$$A y \leq b$$

$$y \geq 0 \quad (4.2)$$

Denklem (4.1)'de $Q(y, \varepsilon)$, ikinci aşama problemin optimal değeridir. Birinci aşama karar değişkeninin maliyeti, c vektörü ile belirtilir. $Q(y, \varepsilon)$ ise aşağıda verilen probleminin optimal değeridir.

$$Q(y, \varepsilon) = \min_{\varepsilon} \{ c^T \varepsilon \mid A \varepsilon \leq b - A y \} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon \geq 0$$

$$c^T \varepsilon + h = 0 \quad (4.4)$$

y vektörünün birinci aşama kararlarını, x vektörü ikinci aşama kararlarını temsil eder. ε vektörü (4.3)'de, ikinci aşama probleminin T , W , h ve q olan parametrelerini içerir. Sadece ayrık dağılımları göz önüne alındığından, ε vektörünün sınırlı sayıda senaryosu vardır; bu nedenle, her senaryoya özgü

$\varepsilon_s = (\varepsilon_s^1, \varepsilon_s^2, h_s, q_s)$ gösterimini kullanılır ve $s=1, \dots, S$ olmak üzere ε_s her senaryonun olasılığını temsil eder. Sınırlı sayıda senaryo ve verilen olasılık

değerlerini göz önüne alarak, aşağıdaki denklemi kullanarak beklenen değeri elde edebilir.

$$\mathbf{z}^T \mathbf{z} = 1$$

$$Q(y, \varepsilon) = \sum_{i=1}^n Q(y, \varepsilon_i) \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_i$$

(4.5) kullanılarak (4.4) yeniden düzenlenirse,

$$\sum_{i=1}^n \left(\mathbf{z}_i^T \mathbf{z}_i + \mathbf{z}_i^T \mathbf{z}_i \right) \quad (4.6)$$

$$\mathbf{z}_i^T \mathbf{z}_i$$

$$\mathbf{z}_i^T \mathbf{z}_i + \mathbf{z}_i^T \mathbf{z}_i = h_i \mathbf{z}_i^T \mathbf{z}_i \geq 0, \forall \mathbf{z}_i \quad (4.7)$$

şeklinde olur.

4.2. Robust Optimizasyon

Robust optimizasyon, gerçek hayatta kesin olarak belirlenemeyen fakat bir küme şeklinde ifade edilebilen parametre ve/veya karar değişkenlerini barındıran bir matematiksel modelin tüm belirsizlik kombinasyonlarında bile uygun çözüm olabilecek bir optimal çözüme kavuşturulması anlamına gelmektedir.

Robust Optimizasyon, büyük yararlar sağlamanın yanı sıra birtakım varsayımları da içermektedir. Bu varsayımlar, yaklaşımının sağladığı büyük avantajların yanı sıra yaklaşım ile elde edilen çıktıyı az da olsa zayıflatmaktadır. Yine de, kazanılan yararların yanında bu varsayımların görmezden gelinebileceği rahatlıkla söylenebilir. Robust optimizasyon yaklaşımının barındırdığı varsayımlar şöyle özetlenebilir (Ben-Tal vd., 2009):

1. Bir optimizasyon probleminin, daha önceden tanımlanmış fakat bilinmeyen birtakım kararların alınmasını gerektirdiğinden aslında bir karar verme problemi olduğu açıktır. Bir optimizasyon probleminde, karar değişkenlerinin belirsiz karar değişkeni ve/veya parametreler ile ilişkisi açısından i) burada ve

şimdi; ve ii) bekle ve gör olmak üzere iki farklı tip karar tanımlanabilir. Burada ve şimdi kararlar önceden belirlenebilir kararlardır. Bu ifade, karar değişkenlerinin belirsiz karar değişkeni ve/veya parametrelerden bağımsız değer aldığı anlamına gelmektedir. Bekle ve gör kararlarında ise, bazı karar

değişkenlerinin belirlenebilmesi için bazı belirsiz karar değişkeni ve/veya parametrelerin kesin olarak bilinmesine ihtiyaç vardır.

Bir başka deyişle, bekle ve gör yapısına sahip karar değişkenleri modeldeki belirsiz karar değişkeni ve/veya parametrelerin bir fonksiyonudur.

Bir stokastik optimizasyon probleminde yer alan tüm karar değişkenlerinin burada ve şimdi kararlar olduğu varsayılmaktadır.

2. Belirsiz verilerin gerçek değeri, bir başka deyişle kesin olarak bilinmeyen tüm karar değişkenleri ve parametrelerin gerçekte aldığı değer, daha önceden tanımlanmış olan bir belirsizlik kümesinin elemanı olmak zorundadır.

3. Stokastik optimizasyon probleminde tüm kısıtların sağlanması zorunludur. Optimizasyon problemleri en genel haliyle belirsiz doğrusal optimizasyon problemi olarak,

$$\max \sum_{j \in J} c_j x_j \quad (4.8)$$

$$\sum_{i \in I} \tilde{a}_{ij} x_j \leq \tilde{b}_i \quad (4.9)$$

$x_j \geq 0$ biçiminde gösterilir.
Verilen model aşağıdaki gibi düzenlenir;

$$\max z = \sum_{j \in J} c_j x_j \quad (4.10)$$

$$\tilde{b}_i - \sum_{j \in J} \tilde{a}_{ij} x_j \leq 0 \quad (4.11)$$

$$\tilde{b}_0 x_0 + \sum_{j \in J} \tilde{a}_{0j} x_j \leq 0 \quad (4.12)$$

$$x_0 = -1 \quad (4.13)$$

Modelde bulunan

$\tilde{a}_{ij}$ ve $\tilde{b}_i$ belirsiz parametrelerdir. $\tilde{a}_{ij}$ $[\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]$ aralığında,
 $\tilde{b}_i$ $[\underline{b}_i, \bar{b}_i]$ aralığında,

Robust optimizasyon modelleri belirsizliği ele alma yöntemlerine göre farklı şekilde sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırma literatürde en sık görülen, belirsizliği küme tabanlı ve senaryo tabanlı olarak ayıran sınıflandırmadır.

4.2.1. Küme tabanlı robust optimizasyon modelleri

Küme tabanlı robust optimizasyonda bazı parametrelerin sınırlandırılmış belirsizlik kümesine ait olduğu varsayılır. Yöntem, belirsiz parametrelerin en kötü değerlerinde çözümün uygunluğunu garanti ederken, belirsizlik kümesi üzerinden amacın minimum değerinin maksimizasyonu elde eder (Düzgün, 2012). Robust optimizasyon modellerinin formülasyonu belirsizlik kümesinin seçimine göre farklılık göstermektedir. En yaygın kullanılan belirsizlik kümeleri;

- Kutu belirsizlik kümesi
- Elipsoid belirsizlik kümesi
- Kutu + Elipsoid belirsizlik kümesi
- Polihedral (çok yüzlü) belirsizlik kümesi
- Kutu + Polihedral belirsizlik kümesidir.

4.2.1.1. Kutu belirsizlik kümesi

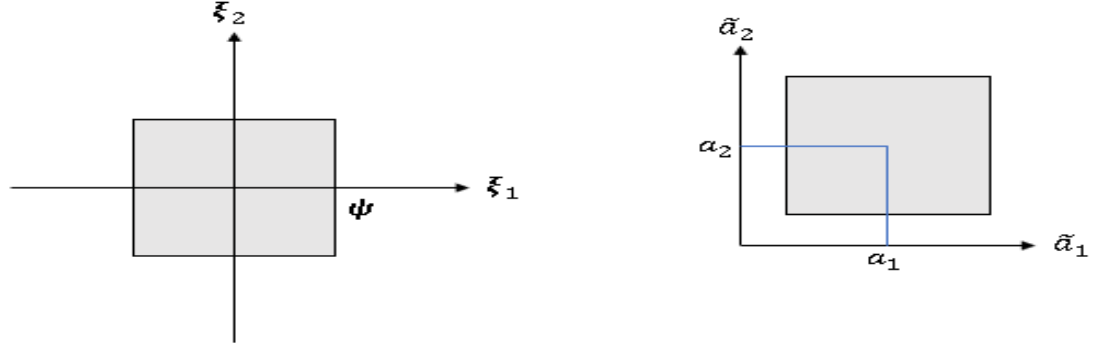
Kutu belirsizliği kümesi, belirsiz veri vektörünün ∞ normu kullanılarak tanımlanmıştır.

$$U_{\infty} = \{\xi \mid \|\xi\|_{\infty} \leq \Psi\} = \{\xi \mid |\xi_j| \leq \Psi, \forall j \in J_i\} \quad (4.14)$$

Burada Ψ , belirsizlik boyutunun kontrolünü yapan ayarlanabilir parametredir.

Şekil 4.1, Ψ parametresi için ayarlanan kutu belirsizliğini göstermektedir.

$\hat{\xi}_j = \xi_j^{\text{nom}} + \xi_j^{\text{var}}$, $j = 1, 2$ ile tanımlanır. ξ_j^{nom} parametrenin gerçek değerini, ξ_j^{var} parametrenin nominal değerini, belirsizliğin raslantı değerlerini ve pozitif sabit dalgalanmaları ifade eder.



Şekil 4.1. Kutu belirsizlik kümesi

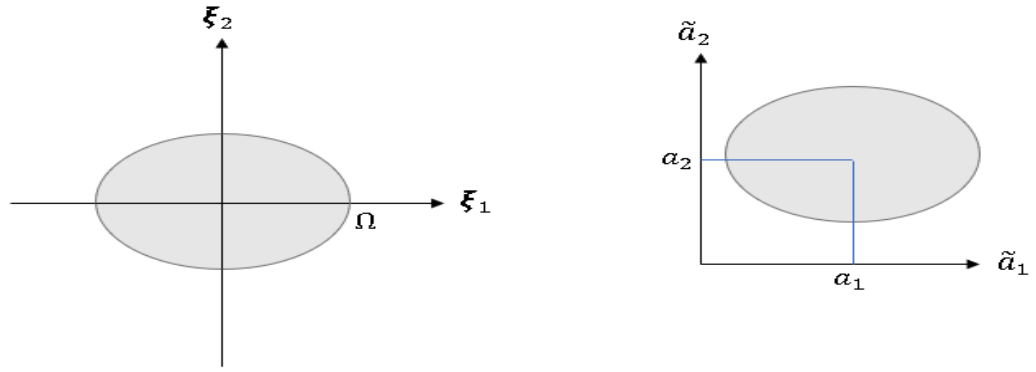
Belirsiz parametrelerin $\tilde{\theta}_i \in [\theta_i^-, \theta_i^+]$, $\forall i \in \mathcal{I}$ aralıklarında sınırlandırıldığı biliniyorsa, belirsizlik $\tilde{\theta}$ ile gösterilebilir ve bu aralık $\tilde{\theta}$ olduğunda kutu belirsiz sızın $\tilde{\theta}$ elemanı $\hat{\theta}$ (Kutu belirsizlik kümesi, belirsizlik setiyle sonuçlanır. Belirsizlik kümesi $\Psi \subseteq 1$ (yani, $\|\tilde{\theta}\| \leq 1$), genel ayarlanabilir sınırlandırılmış kümeyi temsil ederken, aralık belirsiz kümesi bunun özel bir durumudur (Li vd., 2011).

4.2.1.2. Elipsoid belirsizlik kümesi

Elipsoid belirsizlik kümesi, belirsizlik veriler vektörünün 2. normu kullanılarak tanımlanır.

$$\mathcal{E}_\Omega = \{ \xi \mid \|\xi\|_2 \leq \Omega \} = \{ \xi \mid \sum \xi_i^2 \leq \Omega^2 \} \quad (4.15)$$

Ω belirsizlik kümesinin boyutunu kontrol eden ayarlanabilir bir parametredir. Elipsoid kümesinde $\Omega \geq \sqrt{\mathcal{E}_\Omega}$ ve rasal değişken $\xi_i \in [-1, 1]$ ise küme tanımlanır (Li vd., 2011).



Şekil 4.2. Elipsoid belirsizlik kümesi

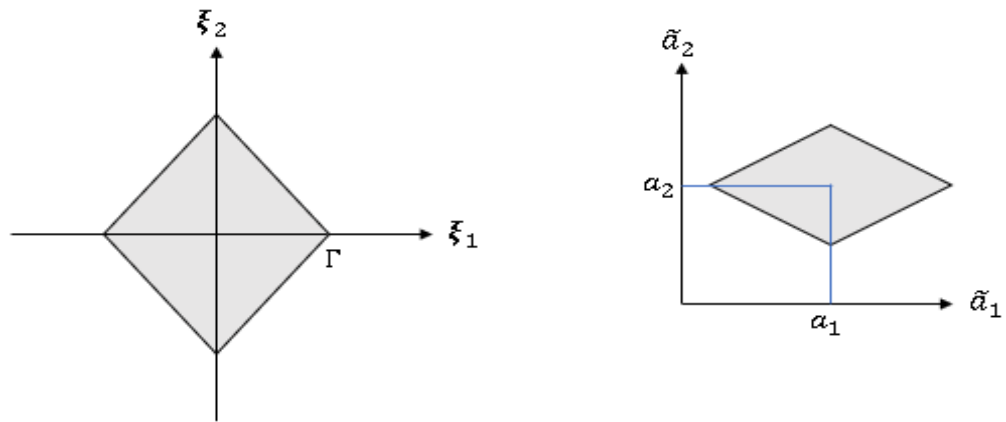
4.2.1.3. Polihedral (çok yüzlü) belirsizlik kümesi

Çok yüzlü belirsizlik kümesi belirsiz veriler vektörünün 1. normu kullanılarak tanımlanır.

$$\Diamond = \{ \xi \mid \|\xi\|_1 \leq \Gamma \} = \{ \xi \mid \sum |\xi_{\diamond}| \leq \Gamma \} \quad (4.16)$$

Burada Γ , belirsizlik boyutunun kontrol eden ayarlanabilir parametredir.

Aşağıdaki Şekil 4.3' de sınırlı belirsizlik için belirsiz alan $\xi_{\diamond} \in [-1, 1]$ ve $\xi_{\diamond} \leq |\diamond|$ çokyüzlü belirsizlik setiyle kaplıdır (Li vd., 2011).



Şekil 4.3. Polihedral (çok yüzlü) belirsizlik kümesi

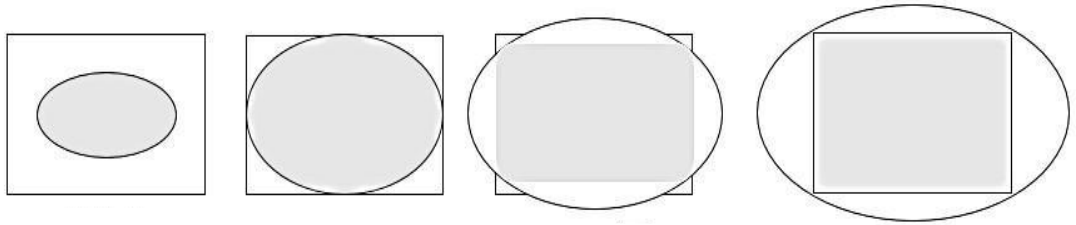
4.2.1.4. Kutu + elipsoid belirsizlik kümesi:

Bu belirsizlik türü, bir elipsoid ile bir kutu arasındaki kesişme olarak tanımlanır ve eşitlik

$$| \xi |^2 \leq \Omega^2$$

$$\mathcal{E}_{\infty} = \{ \xi \mid |\xi| \leq \Omega, |\xi| \leq \Psi, \forall \xi \in \mathcal{E} \} \quad (4.17)$$

şeklinde yazılır. Burada $\Psi \leq \Omega \leq \Psi \sqrt{2}$ dir. Eşitlik (4.17) 'de $\Omega = 1$ için kutu ve elipsoid belirsizlik kümesi kesişimini tanımlar. Bu belirsizlik türü, sınırlanmış belirsizlik için önemlidir. Şekil 4.3'de, $\Omega = 1$ olduğunda, elipsoid kutu tarafından tam olarak kapsanmıştır. $\Omega = \sqrt{2}$ olduğunda ise kutu elipsoid ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 4.4. Kutu + elipsoid belirsizlik kümesi

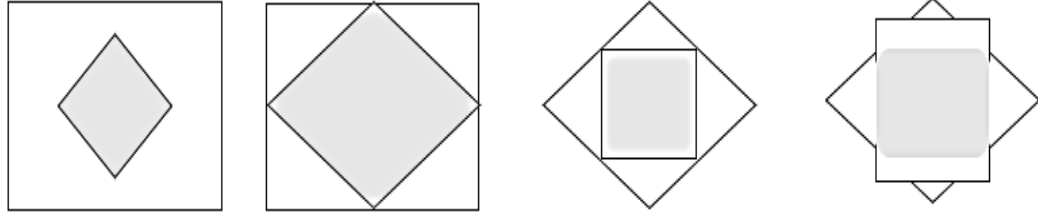
4.2.1.5. Kutu + polihedral belirsizlik kümesi

Bertsimas ve Sim'in çalışmalarında ele alınan kutu ve polihedral kümelerin ara kesitinden oluşan bu belirsizlik türü sınırlandırılmış çokyüzlü belirsizlik olarak da adlandırılabilir ve eşitlik

$$| \xi | \leq \Gamma, |\xi| \leq \Psi, \forall \xi \in \mathcal{E}$$

$$\mathcal{E}_{\infty} = \{ \xi \mid |\xi| \leq \Gamma, |\xi| \leq \Psi, \forall \xi \in \mathcal{E} \} \quad (4.18)$$

şeklinde yazılır.



Şekil 4.5. Kutu + Polihedral belirsizlik kümesi

4.2.1.6. Soyster modeli

Doğrusal Programlamanın uygulamalarında, verilerdeki en küçük belirsizliğin, çözümü anlamsız hale getirme olasılığı göz ardı edilemez. İhtiyaç, mümkün olduğunca veri belirsizliğine karşı sağlam olan modeller geliştirmektir. Bu yöndeki ilk adım 1973 yılında, dışbükey bir kümeye ait tüm veriler için uygun bir çözüm oluşturmak için doğrusal bir optimizasyon modeli öneren Soyster tarafından atıldı. Geliştirilen model, nominal sorun için optimallikten sapma durumunda muhafazakar çözümler üretmektedir(Bertsimas ve Sim, 2003).

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x \\ \text{s.t.} \quad & \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\sum_{i \in I} a_{ij} x_i + \sum_{k \in K} \hat{a}_{kj} x_k \leq b_j \quad \forall j \in J \quad (4.20)$$

$$-x_i \leq x_i \leq x_i \quad \forall i \in I \quad (4.21)$$

$$x_i \leq x_i \leq x_i \quad (4.22)$$

$$x_i \geq 0 \quad (4.23)$$

* optimal çözüm ve iyimserlik $\hat{a}_{kj} = |a_{kj}^*|$ olsun. Denklem yeniden düzenlenirse;

$$\sum_{i \in I} a_{ij} x_i + \sum_{k \in K} \hat{a}_{kj} |x_k^*| \leq b_j \quad \forall j \in J \quad (4.24)$$

$$(4.25)$$

Her i kısıtlaması için $\sum_{j \in J_i} \hat{\sigma}_{ij}^2 |x_{ij}|$ ve $\sum_{j \in J_i} \hat{\sigma}_{ij}^2$ arasındaki boşluğu koruyarak kısıtlamanın "korunmasını" sağlar.

ve $\hat{\sigma}_{ij}^2$ arasındaki boşluğu koruyarak

4.2.1.7. Ben-Tal ve Nemirovski modeli

Ben-Tal ve Nemirovski 1999 ve 2000 yılında yapmış oldukları çalışmalarında, verilerin tam olarak belirtilmediği ve yalnızca belirli bir belirsizlik setine ait olduğu bilinen dışbükey optimizasyon problemini incelemişlerdir.

Geliştirilen model;

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x \\ \text{s.t.} \quad & \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\frac{1}{\Omega} \sum_{j \in J_i} \hat{\sigma}_{ij}^2 |x_{ij}| \leq \sum_{j \in J_i} \hat{\sigma}_{ij}^2 \quad \forall i \in I$$

$$\sum_{j \in J_i} \hat{\sigma}_{ij}^2 |x_{ij}| + \sum_{j \in J_i} \hat{\sigma}_{ij}^2 + \Omega \sqrt{\sum_{j \in J_i} \hat{\sigma}_{ij}^2} \leq c_i \quad \forall i \in I \quad (4.27)$$

$$-x_{ij} \leq x_{ij} \leq x_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (4.28)$$

$$x_{ij} \leq x_{ij} \leq x_{ij} \quad (4.29)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (4.30)$$

U veri belirsizliği altında, i sınırının ihlal edilme ihtimalinin en fazla $\exp(-\Omega^2/2)$ olduğunu gösterilmiştir. Bu modelin dezavantajı, doğrusal olmayan bir model olduğundan, robust kesikli optimizasyon modellerini çözmekte zorluk yaşanmasıdır.

4.2.1.8. Bertsimas ve Sim modeli

Bertsimas ve Sim robust doğrusal programlamada kutu ve polihedral belirsizlik kümelerinin kesişimine dayanan kutu+polihedral belirsizlik kümesi kullanmışlardır. Bertsimas ve Sim modelini açıklamak için basit doğrusal programlama modeli ele alınsın;

(4.31)

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^n \alpha_i \\ \text{s.t.} \quad & \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \geq \gamma, \quad \forall \gamma \in \Gamma \quad (4.32)$$

$$\alpha_i \geq 0, \quad \forall i \quad (4.33)$$

Yukarıdaki denklem (4.32)'de α_i belirsiz parametre ve γ i kısıtlamaları altında belirsiz parametreler kümesi olsun.

$i \in \{1, \dots, n\}$ için her α_i belirsiz parametresi $[\alpha_i^{\min}, \alpha_i^{\max}]$ aralığındaki değerleri alan bir rasgele değişkendir. $\alpha_i^{\min}$ belirsiz parametrenin nominal değeri ve $\alpha_i^{\max}$ her tanımlanan Γ parametresindeki belirsizlik b. e. adlandırılır ve $\alpha_i^{\max}$ her bir belirsiz parametre için sabit dalgalanmalar anlamına gelir. Her α_i için $[0, 1]$ aralığında değişen belirsizlik düzeyini ayarlar. Γ parametresi, önerilen yöntemin sağlamlığını ayarlamaktır. $\Gamma=0$ olduğunda, sınırlamalar nominal değere eşit olur ve $\Gamma = [\alpha_i^{\max}]$ olduğunda ise en kötü durumu ifade eder ve model Soyster'in robust formülasyonuna dönüşür. Γ robust modelin sağlamlılık seviyesini ayarlamaya yardımcı olur. Bertsimas ve Sim, doğrusal olmayan belirsiz modelin şu şekilde yazılabildiğini kanıtlamıştır:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^n \alpha_i \\ \text{s.t.} \quad & \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \geq \gamma, \quad \forall \gamma \in \Gamma \quad (4.35)$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad (4.36)$$

Burada $\Omega = \{(\alpha_i) \mid \alpha_i \in [\alpha_i^{\min}, \alpha_i^{\max}], \alpha_i \in \{0, 1\}\}$ belirsizlik kümesini tanımlar.

α_i^* in optimal çözüm olduğunu varsayalım, $\beta_i(\alpha_i^*, \Gamma_i)$ fonksiyonu koruma fonksiyonu olarak adlandırılır ve doğrusal programlama modeli olarak yazılabilir.

$$\beta_i(\alpha_i^*, \Gamma_i) = \max \{ \sum_{j=1}^n \alpha_j \mid \alpha_j \in [\alpha_j^{\min}, \alpha_j^{\max}] \} \quad (4.37)$$

$$\sum_{\substack{1\leq i\leq n\\ 1\leq j\leq m}}\leq \tag{4.38}$$

$$\Gamma_{\mathbb{Q}}$$

$$0\leq \varphi_{\alpha}\leq 1\forall \alpha\in \mathbb{N} \tag{4.39}$$

(4.32) 'de (4.33)'in ikili formunu değiştirerek, belirsiz lineer programlama modelinin robust karşılığı türetilmiştir:

$$\min \sum_{i \in I} c_i x_i \quad (4.40)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in I} a_{ij} x_i \leq b_j, \forall j \in J \quad (4.41)$$

$$\sum_{i \in I} \bar{a}_{ij} x_i - \Gamma_j \Gamma_j - \sum_{i \in I} \bar{a}_{ij} x_i \geq \Gamma_j \quad (4.42)$$

$$\bar{a}_{ij} + \bar{a}_{ij} \geq \bar{a}_{ij}, \forall i \in I, j \in J \quad (4.43)$$

$$\bar{a}_{ij} \geq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (4.44)$$

$$\bar{a}_{ij} \geq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (4.45)$$

$$\bar{a}_{ij} \geq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (4.45)$$

$\bar{a}_{ij}$ ve $\bar{a}_{ij}$ yardımcı değişkenlerdir. Bu yaklaşımın nominal değerlerinden belirsiz katsayıların sayısına kadar, sağlam çözüm mümkün kalır. 1. kısıtlamasında Γ_j den fazla değişiklik varsa, sağlam çözüm olasılık ile mümkün kalır:

$$P(\sum_{i \in I} \bar{a}_{ij} x_i > \Gamma_j) \leq 1 - \phi(\Gamma_j - 1/\sqrt{|I|}) \quad (4.46)$$

$$\phi(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\theta} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (4.47)$$

Eşitsizlik (11),

robust modelin en uygun çözümü ve $\phi(\theta)$ standart normal

Φ^*

dağılım birikimli fonksiyonudur.

Robust programlama modellerinde belirsizlik katsayısı dahil olmak üzere amaç fonksiyonu katsayılar ve kısıtların sağ tarafı da belirsiz olabilir;

- Modelde amaç fonksiyonu katsayısı olan c_i katsayısı belirsiz olursa, modele değiştirilir.
- Modelde kısıtın sağ tarafı olan b_j katsayısı belirsiz olursa, modele $\bar{b}_{j+1}$ değişkeni ve $\bar{b}_{j+1} = 1$ ile $\bar{b}_{j+1} - \bar{b}_{j+1} \geq 0$ kısıtı ve $\bar{b}_{j+1}$ sütunu gibi b eklenir (Bertsimas ve Brown, 2009).

4.2.2. Senaryo tabanlı robust optimizasyon modelleri

Senaryo tabanlı robust optimizasyon yaklaşımı, deterministik modelin yapısını doğrusaldan, doğrusal olmayana dönüştürmektedir. Bu durum hesaplamalar açısından problemi daha karmaşık bir yapıya sokmaktadır.

Yöntem, enerji kapasite genişleme problemlerine, finansal planlama, telekomünikasyon ağlarının genişletilmesi, hava kuvvetleri ve havayolları planlamaları ve portföy yönetimi gibi alanlarda uygulanmıştır (Düzgün, 2012).

Senaryo tabanlı robust optimizasyonda, yapısal ve kontrol bileşenleri olmak üzere iki farklı birleşen vardır. Yapısal bileşenler; sabit ve girdi verisi olup, herhangi bir belirsizlik içermez. Kontrol bileşenleri ise girdi verisinin belirsizlik içeren bileşenleridir (Mulvey vd., 1995).

4.2.2.1. Mulvey vd. modelleri

Mulvey vd. (1995) tarafından tek periyotlu maliyet minimizasyonunu amaçlayan doğrusal senaryo tabanlı robust optimizasyon modeli geliştirilmiştir.

İlk olarak $x \in \mathbb{R}^n$ tasarım değişkenleri vektörü ve $y \in \mathbb{R}^m$ kontrol değişkenleri vektörü olsun. Robust modelinin yapısı şu şekildedir;

$$\min z = c^T x + d^T y \quad (4.48)$$

s.t.

$$Ax = b \quad (4.49)$$

$$Bx + Cy = e \quad (4.50)$$

$$x, y \geq 0$$

Kısıt (4.49), yapısal kısıttır, kısıt (4.50) kontrol kısıdıdır. Yapısal kısıtın katsayıları sabit ve veri değişikliklerinden etkilenmezken ve kontrol kısıtının

katsayıları veri değişikliklerinden etkilenir. ω_s her $s \in \Omega$ senaryosu altında, s senaryosunun olasılığını göstermekle beraber $\sum_{s \in \Omega} \omega_s = 1$ olan sabit bir ω_s olasılığı ile

$\{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4\}$ değerlerini alır. Modelin sağlam olabilmesi için her $s \in \Omega$ senaryosu, optimal sonuca yakın olması gerekir. Buna çözüm sağlamlığı denir. Her $s \in \Omega$ senaryosu için δ_s kontrol değişkeni ve kontrol kısıtlarında izin verilen durumu ölçecek δ_s hata vektörü tanımlanır. Böylece daha önce verilmiş model şu şekle dönüştürülür.

$$\min \sigma(x, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + \omega' \rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) \quad (4.51)$$

s.t.

$$\bar{x}_s + \bar{x}_s \delta_s = e_s \quad (4.52)$$

$$\bar{x}_s + \bar{x}_s \delta_s = e_s \quad (4.53)$$

Robust modeli çözümlü senaryolarla modelde dahil ettiğinden, kısıt (4.48)'deki amaç fonksiyonunun birinci terimi $\bar{x}_s + \bar{x}_s \delta_s$ için $s \in \Omega$ senaryosunda $\bar{x}_s$ olarak

$$\bar{x}_s + \bar{x}_s \delta_s$$

değerine dönüşür. Amaç fonksiyonun ikinci terimi $\rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$

$$\bar{x}_s + \bar{x}_s \delta_s$$

$$\bar{x}_s + \bar{x}_s \delta_s$$

kontrol kısıtlarının aşılması durumunun ceza fonksiyonudur. Kontrol kısıtlarının aşılması, bazı senaryolar için anlamsız sonuçların elde edilmesi demektir. ω' ağırlığının kullanılmasının amacı, ilk terim $\sigma(\cdot)$ ile tanımlanan çözüm sağlamlığı ve ikinci terim $\rho(\cdot)$ ile tanımlanan model sağlamlığı arasındaki değişim sağlanabilir. Eğer $\omega' = 0$ ise, amaç fonksiyonu $\sigma(\cdot)$ minimize edilir ve çözüm olursuz olur ya da ω' çok büyük alınırsa $\rho(\cdot)$ amaç fonksiyonunda yüksek maliyetlerle gerçekleşir (Leung, 2007).

Mulvey vd. (1995), tarafından önerilen modelde Markowitz (1991)'in ortalama/varyans modeli kullanılarak $\sigma(\cdot)$ değerinin ortalama değerine λ sabiti çarpı varyans eklenerek,

$$\sigma(x, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \xi_i + \lambda \sum_{i=1}^n (\xi_i - \sum_{j=1}^n \bar{x}_j \xi_j)^2 \quad (4.55)$$

$$\sigma(x, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \xi_i + \lambda \sum_{i=1}^n (\xi_i - \sum_{j=1}^n \bar{x}_j \xi_j)^2$$

şekline dönüşür (Mulvey vd., 1995).

4.2.2.2. Yu ve Li modeli

Yu ve Li (2000), yaptıkları çalışmada Mulvey vd.'nin robust modelini geliştirmişlerdir. Mulvey vd.'nin robust optimizasyon modeli doğrusal olmayan programlama modeli iken geliştirilen modelde S senaryo sayısı ve n toplam kısıt sayısı olmak üzere, θ_i ve ξ_i değişken eklenerek doğrusal modeline dönüştürülmüştür.

$$\min \sum_{i \in I} c_i x_i + \sum_{i \in I} \xi_i (\xi_i - \sum_{s \in S} \xi_{is} x_i + 2\theta_i) + \sum_{i \in I} \theta_i (\sum_{s \in S} \xi_{is} (x_i + \xi_{is} - \xi_i) + \xi_{is} + \xi_i) \quad (4.56)$$

$$\text{s.t.} \quad \xi_{is} = \xi_i, \quad (4.57)$$

$$(\sum_{s \in S} \xi_{is} x_i) - (\xi_i) - \theta_i \leq 0 \quad (4.58)$$

$$\xi_{is} - \xi_i \leq 0 \quad (4.59)$$

$$\xi_i \geq 0, \theta_i \geq 0, \forall i \in I \quad (4.60)$$

4.2.2.3. Kouvelis ve Yu modeli

Kouvelis ve Yu(1997) yapmış oldukları çalışmalarında girdi verileri belirsizliği senaryo temelli bir yaklaşımla karar modeline dahil edilmiştir. Özel bir girdi veri senaryosu, karar modelinin önemli parametrelerinin potansiyel olarak gerçekleştirilmesini temsil etmektedir. Girdi verisi belirsizliğini oluşturmak için senaryoların kullanılması, karar vericinin karar ortamındaki belirsiz girdi parametreleri ile karar modeli arasındaki ilişkisini tanımlamasını olanak sağlar.

S girdi veri senaryo kümesi olsun. X karar değişkeni ve D girdi kümesi olsun. ξ_i^s s senaryosundaki girdi kümesi, ξ_i s senaryosunun olurlu çözüm kümesi ve $\xi_i \in \xi_i^s$ olmak üzere $\xi_i(\xi_i^s, \xi_i)$ fonksiyonu tanımlansın. ξ_i^s için en uygun senaryo kararı ξ_i^* olmak üzere senaryo tabanlı optimizasyon problemi aşağıdaki gibi sunulabilir;

$$\min_{x \in F_s} \sum_{i \in I} c_i x_i \quad (4.61)$$

$$\xi_i^* = \xi_i^s(\xi_i^s) = \min_{x \in F_s} \xi_i(\xi_i^s, \xi_i)$$

)

Mutlak robust karar x^* , girdi senaryoları üzerindeki tüm kararlar arasında maksimum toplam maliyeti en aza indiren karar olarak tanımlanmaktadır.

$$\max_{x \in N} \min_{s \in S^F} \max_{s \in S} f(x, D^s) \quad (4.62)$$

$$Z_A = \max_{x \in N} \min_{s \in S} f(x, D^s)$$

Robust sapma kararı x^* , girdi senaryoları üzerindeki tüm olası kararlar arasında, iyilikten en kötü durum sapmasını gösteren karar olarak tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} & \max_{x \in N} \min_{s \in S^F} \max_{s \in S} (f(x, D^s) - f(x^*, D^s)) \\ & = \max_{x \in N} \min_{s \in S^F} \max_{s \in S} (f(x, D^s) - f(x^*, D^s)) \end{aligned} \quad (4.63)$$

Göreceli robust olan karar x^* , girdi senaryoları üzerindeki tüm olası kararlar arasında, iyilikten en iyi durumda yüzde sapmayı gösteren karardır.

$$\begin{aligned} & \max_{x \in N} \min_{s \in S^F} \max_{s \in S} \frac{f(x, D^s) - f(x^*, D^s)}{f(x^*, D^s)} \\ & = \max_{x \in N} \min_{s \in S^F} \max_{s \in S} \frac{f(x, D^s) - f(x^*, D^s)}{f(x^*, D^s)} \end{aligned} \quad (4.64)$$

$\} - 1$

(4.65)

$$s \in \mathcal{S}^F$$

$$(X_s, D)$$

Kötümser bir yaklaşım olduğundan, tüm girdi senaryoları arasından en düşük getiriyi sağlayan kararlar arasından getirisi en yüksek olan senaryo seçilir.

4.3. Box-Jenkins ile modelleme

Box-Jenkins yöntemi 1976 yılında George E.P. Box ve Gwilym M. Jenkins tarafından durağan tek değişkenli zaman serilerinin analizi için geliştirilmiştir. ARIMA modelleri olarak da adlandırılan Box-Jenkins yönteminin tek değişkenli model olarak da tahmin yöntemleri arasında kısa dönem tahminde başarılı sonuçlar vermektedir (Yaffee and McGee 2000).

ARIMA modelleri durağan olan veya durağan olmayan serilerin fark alınarak durağanlaştırılmasıyla elde edilen serilere uygulanabilir (İslamoğlu, 2015). Bir ARIMA modeli ARIMA (p,d,q) olarak gösterilir ve p, d ve q parametreleri negatif olmayan tamsayılardır. p otoregresif model, d seriyi durağan hale getirmek için alınan farkın derecesi ve q hareketli ortalama modelidir. Matematiksel olarak, tipik bir ARIMA modeli;

$$Y_t = \mu + \sum_{i=1}^d \nabla^i Y_t + \sum_{j=1}^p \phi_j \nabla^d Y_{t-j} + \sum_{k=1}^q \theta_k \nabla^d Y_{t-k} + \epsilon_t \quad (4.66)$$

olarak yazılır. Yukarıdaki denklem (4.66)'da μ sabit terim olup, zaman serilerinin ortalamasını temsil eder. ϕ_j katsayısı özbağlanımlı parametre ve

θ_k katsayısı ise hareketli ortalama parametresidir (Mount vd., 2010). ARIMA modelinin akış diyagramı aşağıdaki gibidir;

Adım 1: ARIMA modeli yalnızca sabit zaman serilerinde uygulanabildiğinden, tüm verilerinin durağanlığını kontrol edin. Sabit zaman serileri sabit ortalamaya ve sabit varyansa sahiptir. Veriler sabit değilse, birinci dereceden fark işlemi gerçekleştirilir. Birinci fark sonucunda veri durağan değilse, bu işlem tekrarlanır. Bu adımda Augmented Dickey–Fuller testi kullanılması önerilir.

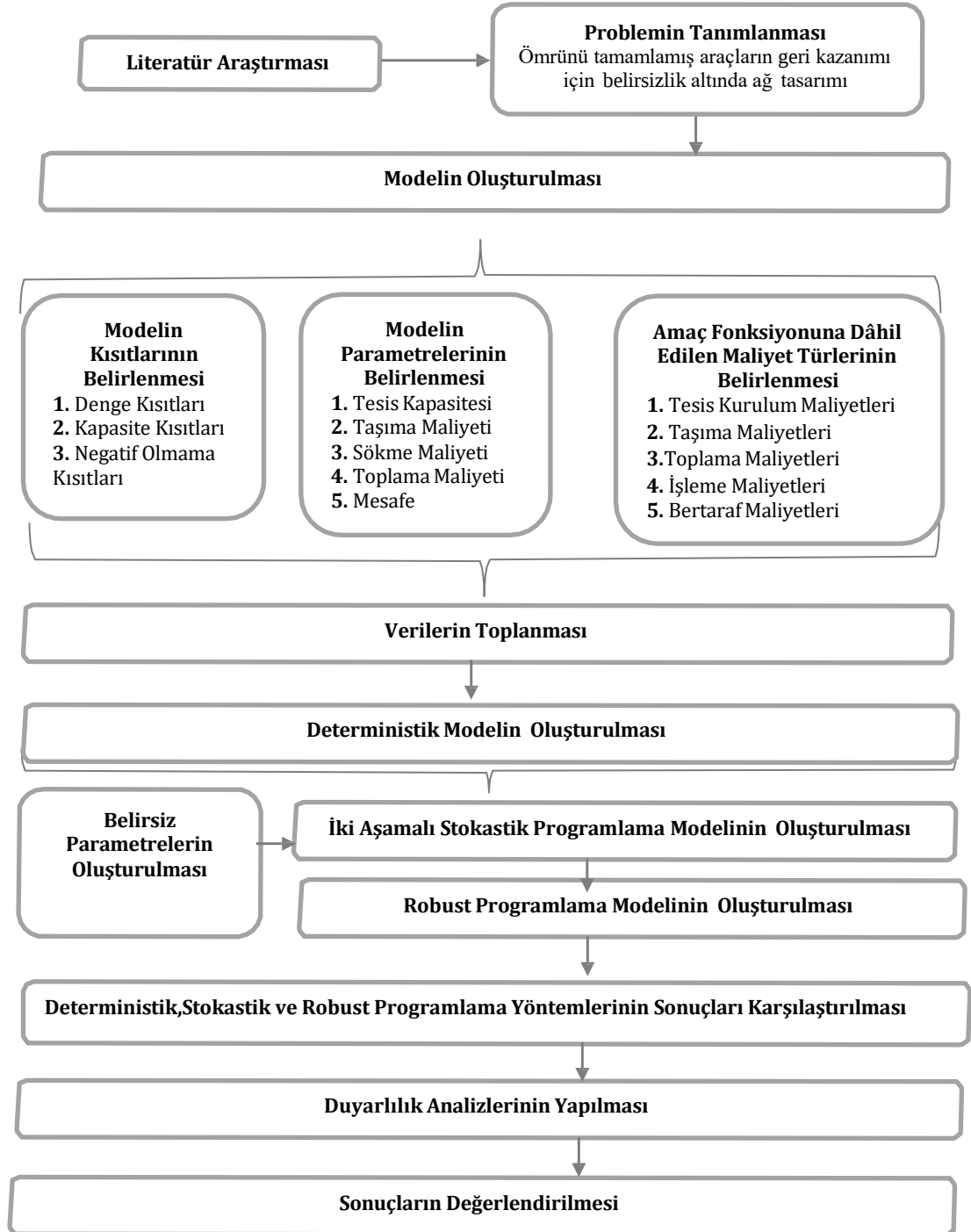
Adım 2: ARIMA(p,d,q) için parametreler tahmin edilirken, d Adım 1'den elde edilen farkın derecesini ifade eder. p ve q belirlenirken ise, Niteliksel Analiz için Otomatik Korelasyon Fonksiyonu (ACF) ve Kısmi Otomatik Korelasyon Fonksiyonu (PACF) grafikleri çizilir. ACF katlanarak azalırsa ve PACF ilk p gecikmelerinde yükselirse, model ARIMA(p,0,0) gibi otoregresif bir süreç olabilir. Hareketli ortalama modeli olan ARIMA (0,0,q) için, ACF ilk q gecikmelerinde yükselir ve PACF katlanarak azalır. Bununla birlikte, p ve q değerlerini sadece ACF ve PACF grafikleri ile tahmin etmek doğru değildir. Akaike Info Criterion (AIC) ve Schwarz Criterion (SC) gibi çeşitli kriterler nicel analizde spesifik değerleri elde etmek için kullanılabilir.

Adım 3: Adım 2'de elde edilen ARIMA modelini doğrulayın ve kalıntıları test edin. Kalan terim, sabit varyans ve sıfır ortalama var ise normal dağılım olduğu kabul edilir ve ARIMA modellemeye gerek yoktur.

Adım 4: Her bir faktör için gelecekteki verileri tahmin edin.

5. TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIMI İÇİN ÖNERİLEN MODELİN TANIMI VE FORMÜLASYONU

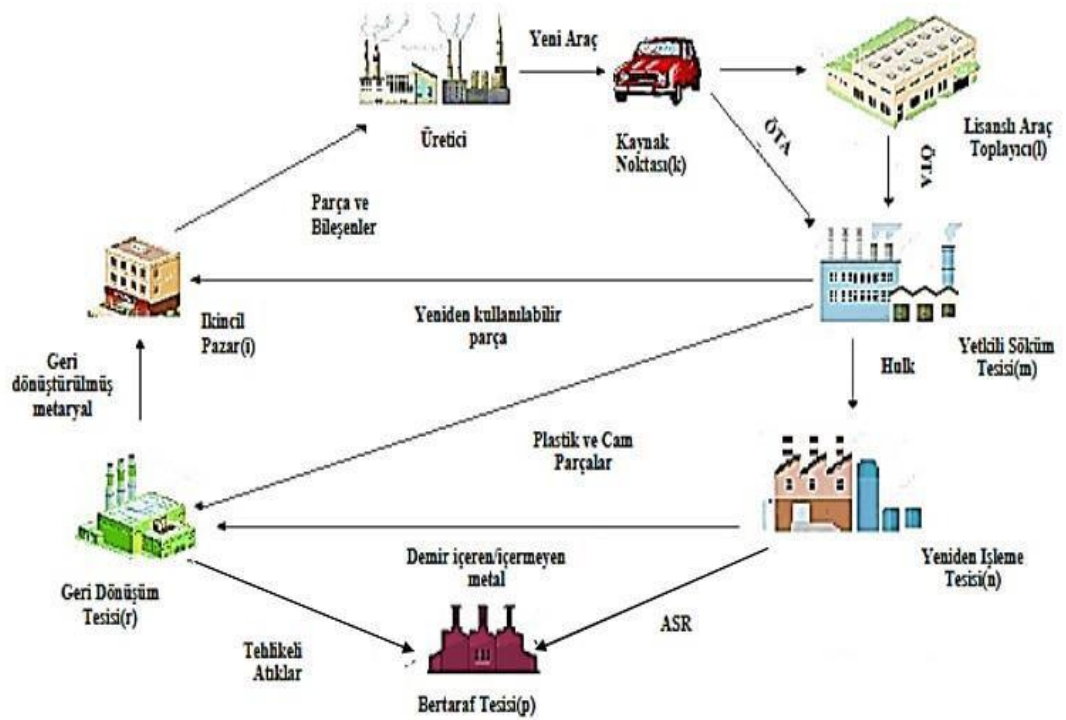
Bu bölümde ele alınan geri kazanım problemi için metodoloji sunulacaktır. Tez kapsamında ele alınan problemin çözümü için gerekli olan adımlar Şekil 5.1’de verilmektedir.



Şekil 5.1. ÖTA geri kazanım süreci akış şeması

5.1. Önerilen Modelin Tanımı

Genel bir ÖTA geri dönüşüm sürecinde, son kullanıcılar ömrünü tamamlamış olan araçlarını bakanlık tarafından lisanslandırılmış toplama merkezleri ya da söküm tesislerinden birine bir bedel ödemeksizin teslim etmekle yükümlüdürler. ÖTA'yı sahibinden teslim alan işletme yönetmeliğe uygun olarak çeşitli belgeleri düzenlemekte ve ÖTA'yı sahibinin üzerinden düşmektedir. Toplama merkezlerinde toplanan ÖTA'lar söküm tesislerine gönderilmekte burada arındırma işlemi uygulandıktan sonra, değerli parçalardan, diferansiyel transmisyon (şanzıman), gövde paneller (kaporta, kapılar tampon) ve tekerlekler doğrudan üreticiye gönderilmektedir. Geriye kalan araç "hulk" preslenerek yine bakanlık tarafından lisanslandırılmış olan işleme tesislerine gönderilmektedir. İşleme tesislerinde çeşitli işlemler sonrası elde edilen demirli ve demirli olmayan malzemeler geri dönüşüm tesislerine gönderilmekte, malzemeler geri dönüşüm tesislerine gönderilmekte, geriye kalan ASR ise bertaraf merkezine gönderilerek elden çıkarılmaktadır. ÖTA'ların geri kazanımı için genel bir ağ yapısı Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2. ÖTA geri kazanım süreci

Ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü kapsamında oluşturulan model açık döngü, tek amaçlı, tek ürünlü bir geri dönüşüm ağ tasarımı problemidir. Kurulan modelde hedef toplam ağ maliyetini en aza indirmektedir.

5.2. Modelin Formülasyonu ve Varsayımları

5.2.1. Modelin formülasyonu

Bu bölümde, yapılan çalışma ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Çalışmada incelenen durum ve önerilen modeller;

Durum: Kullanıcılardan toplanan ÖTA'ların lisanslı araç toplayıcılarına ve yetkili söküm tesislerine transfer edilmesi

Model 1: Ağın Deterministik programlama ile modellenmesi

Model 2: Ağın Stokastik programlama ile modellenmesi

Model 3: Ağın Robust programlama ile modellenmesi

şeklindedir.

5.2.2. Modelin varsayımları

Önerilen deterministik modelde aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir:

- Tüm ÖTA'lar toplanmalıdır.
- Son araç sahipleri ömrünü tamamlamış araçlarını (ÖTA), lisanslı araç toplama merkezleri ya da yetkili söküm tesislerinden birine iade etmek zorundadır.
- İmalâtçılar ÖTA'ları aracın son sahibinden ücretsiz olarak geri almak zorundadırlar.
- Ağdaki tüm tesisler kısıtlı kapasiteye sahiptir.
- Ağdaki tüm maliyetler bilinmektedir.
- Geri dönüşüm oranları ve ürün işleme- bertaraf oranları bilinmektedir.
- Amaç fonksiyonun katsayıları deterministiktir ve önceden bilinir.
- Ağdaki hiçbir tesiste stok tutmaya izin verilmez.

5.3. Model 1'in Formülasyonu: Deterministik Programlama

Bu bölümde önerilen tersine lojistik ağın Deterministik programlama ile modellenmesi yapılmıştır. Çizelge 5.1 modelin indislerini, Çizelge 5.2 modelin parametrelerini, Çizelge 5.3 modelin değişkenlerini tanımlamaktadır.

Çizelge 5.1. İndisler

İndisler	
k	kaynak noktası
l	toplama merkezi
m	yetkili söküm tesisi
n	yeniden işleme tesisi
i	ikincil Pazar/market
p	bertaraf tesisi
r	geri dönüşüm tesisi
e	<u>bileşen/malzeme miktarı</u>

Çizelge 5.2. Parametreler

Parametreler	
M_k	k. ÖTA kaynağında kaydı silinen araç miktarı
Açılış maliyeti	
f_p	p. bertaraf tesisinin açılış maliyeti
Kapasite	
K_l	toplama merkezi l'nin kapasite miktarı
K_m	söküm tesisi m'nin kapasite miktarı
K_n	işleme tesisi n'nin kapasite miktarı
K_p	bertaraf tesisi p'nin kapasite miktarı
K_r	geri dönüşüm tesisi r'nin kapasite miktarı
Taşıma maliyeti	
c_{km}	k kaynak noktası ve m söküm tesisi arası birim taşıma maliyeti
c_{kl}	k kaynak noktası ve l toplama merkezi arası birim taşıma maliyeti
c_{ml}	m söküm tesisi ve l toplama merkezi arası birim taşıma maliyeti
c_{mr}	m söküm tesisi ve r geri dönüşüm tesisi arası birim taşıma maliyeti
c_{mn}	m söküm tesisi ve n işleme tesisi arası birim taşıma maliyeti
c_{mi}	m söküm tesisi ve i ikincil pazar arası birim taşıma maliyeti
c_{np}	n işleme tesisi ve p bertaraf tesisi arası birim taşıma maliyeti
c_{nr}	n işleme tesisi ve r geri dönüşüm tesisi arası birim taşıma maliyeti
c_{rp}	r geri dönüşüm tesisi ve p bertaraf tesisi arası birim taşıma maliyeti
c_{ri}	r geri dönüşüm tesisi ve i ikincil pazar arası birim taşıma maliyeti
Sökme maliyeti	
s_m	m söküm tesisinde birim sökme maliyeti
s_n	n işleme tesisinde birim işleme maliyeti
s_p	p bertaraf tesisinde bertaraf etme maliyeti
s_r	r geri dönüşüm tesisinde birim geri dönüşüm maliyeti
Toplama maliyeti	
i_l	l toplama merkezinde birim başına ÖTA toplama maliyeti

i_m	m yetkili sökümler tesisinde birim başına ÖTA toplama maliyeti
Mesafe (km)	
	k. kaynak noktası ile m. sökümler tesisi arasındaki uzaklık
	l. toplama merkezi ile m. sökümler tesisi arasındaki uzaklık
	m. sökümler tesisi ile n. işleme tesisi arasındaki uzaklık
	m. sökümler tesisi ile r. geri dönüşüm tesisi arasındaki uzaklık
	m. sökümler tesisi ile i. ikincil pazar arasındaki uzaklık
	n. işleme tesisi ile p. bertaraf tesisi arasındaki uzaklık
	n. işleme tesisi ile r. geri dönüşüm tesisi arasındaki uzaklık
	r. geri dönüşüm tesisi ile p. bertaraf tesisi arasındaki uzaklık
	r. geri dönüşüm tesisi ile i. ikincil pazar arasındaki uzaklık
Diğer parametreler	
e1	ÖTA içerisindeki hulk ağırlık yüzdesi
e2	Hulk içerisindeki ASR'nin ağırlık yüzdesi
e3	ÖTA içerisindeki e komponent/materyalin yeniden kullanılabilir ağırlık yüzdesi
e4	ÖTA içerisindeki e komponent/materyalin yeniden kullanılamayacak olan ağırlık yüzdesi
e5	Hulk içerisindeki e materyalinin geri dönüştürülebilir ağırlık yüzdesi
e6	Geri dönüştürülebilir materyal içerisindeki e bertaraf ağırlık yüzdesi

Değişkenler	
2,2	k. kaynak noktasından l. toplama merkezine gönderilen öta miktarı
2,2	k. kaynak noktasından m. söküm tesisine gönderilen öta miktarı
2,2	l. toplama merkezinden m. söküm tesisine gönderilen öta miktarı
2,2	m. söküm tesisinden n. işleme tesisine gönderilen hulk miktarı
2,2	m. söküm tesisinden r. geri dönüşüm tesisine gönderilen e plastik/cam parça miktarı
2,2	m söküm tesisinden ve i ikincil pazara gönderilen e yeniden kullanılabilir parça miktarı
2,2	n işleme tesisi ve p bertaraf tesisine gönderilen asr miktarı
2,2	n işleme tesisi ve r geri dönüşüm tesisine gönderilen e metal miktarı
2,2	r geri dönüşüm tesisinden p bertaraf tesisine bertaraf miktarı
2,2	r geri dönüşüm tesisinden i ikincil pazara gönderilen e geri dönüştürülmüş parça miktarı
2,2	p. bertaraf tesisinin açılıp açılmama kararı (1/0)

[illegible]

$$\sum_{i,j} \sum_{k,l} c_{ijkl} x_{ijkl} + \sum_{i,j} \sum_{k,l} \sum_{m,n} c_{ijklmn} x_{ijklmn} \text{ (Geri Dönüşüm Maliyeti) } +$$

$$\sum_{i,j} \sum_{k,l} c_{ijkl} x_{ijkl} + \sum_{i,j} \sum_{k,l} \sum_{m,n} c_{ijklmn} x_{ijklmn} \text{ (Ürün Bertaraf Maliyeti))} \quad (5.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} + \sum_{i,j} x_{ijklmn} = M_{ij} \quad \forall i, j \quad (5.2)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} = \sum_{i,j} x_{ijklmn} \quad \forall i, j \quad (5.3)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} = e1. (\sum_{i,j} x_{ijkl} + \sum_{i,j} x_{ijklmn}) \quad \forall i, j \quad (5.4)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} = e2. (\sum_{i,j} x_{ijkl} + \sum_{i,j} x_{ijklmn}) \quad \forall i, j \quad (5.5)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} = e3. A. (\sum_{i,j} x_{ijkl} + \sum_{i,j} x_{ijklmn}) \quad \forall i, j \quad (5.6)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} = (1-e4). B. \sum_{i,j} x_{ijkl} \quad \forall i, j \quad (5.7)$$

$$\sum_{i,j} \sum_{k,l} x_{ijklmn} = e4. C. \sum_{i,j} x_{ijkl} \quad \forall i, j \quad (5.8)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} = e5. (\sum_{i,j} x_{ijkl}) \quad \forall i, j \quad (5.9)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} = e5. (\sum_{i,j} \sum_{k,l} x_{ijklmn}) \quad \forall i, j \quad (5.10)$$

$$\sum_{i,j} \sum_{k,l} x_{ijklmn} = (1-e5). (\sum_{i,j} x_{ijkl}) \quad \forall i, j \quad (5.11)$$

$$\sum_{i,j} \sum_{k,l} x_{ijklmn} = (1-e5). (\sum_{i,j} \sum_{k,l} x_{ijklmn}) \quad \forall i, j \quad (5.12)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} \leq C_{ij} \quad \forall i, j \quad (5.13)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} + \sum_{i,j} x_{ijklmn} \leq D_{ij} \quad \forall i, j \quad (5.14)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} \leq E_{ij} \quad \forall i, j \quad (5.15)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} + \sum_{i,j} \sum_{k,l} x_{ijklmn} \leq F_{ij} \quad \forall i, j \quad (5.16)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijkl} + \sum_{i,j} x_{ijklmn} \leq G_{ij}, H_{ij}, I_{ij}, J_{ij}, K_{ij}, L_{ij}, M_{ij}, \quad \forall i, j \quad (5.17)$$

$$x_{ijkl}, x_{ijklmn}, x_{ijklmn} > 0 \quad \forall i, j, k, l, m, n \quad (5.18)$$

$$x_{ijkl}, x_{ijklmn}, x_{ijklmn} > 0 \quad \forall i, j, k, l, m, n \quad (5.19)$$

$$x_{ij} = \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (5.20)$$

Modelin açıklaması şu şekildedir; amaç fonksiyonu 5.1’de toplam maliyet minimize edilmektedir. Oluşturulan amaç fonksiyonu 7 bileşene sahiptir. Birinci bileşen bertaraf tesisinin tesis sabit kurulum maliyetini göstermektedir. İkinci bileşen, ağıın ulaşım maliyetini, üçüncü bileşen ÖTA’ların toplanma maliyetini, dördüncü bileşen yetkili söküm tesisine gönderilen ÖTA’ların söküm maliyetini, beşinci bileşen yeniden işleme/parçalama tesisine gönderilen Hulk’ların yeniden işleme/parçalama maliyetini, altıncı bileşen geri dönüşüm tesisine gönderilen parça ve bileşenlerin geri dönüşüm maliyetini ve son olarak yedinci bileşen geri dönüşüm tesisine gönderilen ASR’lerin ve tehlikeli ve zehirli atıkların elden çıkarma/ bertaraf maliyetini temsil etmektedir.

- Kısıt (5.2), araç kullanıcılarından, lisanslı araç toplayıcıları ve yetkili söküm tesislerine taşınan ÖTA miktarının, araç kullanıcılarında bulunan toplam ÖTA miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.3), araç kullanıcılarından lisanslı araç toplayıcılarına taşınan ÖTA miktarının, lisanslı araç toplayıcılarından yetkili söküm tesisine gelen ÖTA miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.4), yetkili söküm tesisinden yeniden işleme/parçalama tesisine taşınan Hulk miktarının, lisanslı araç toplayıcıları ve araç kullanıcılarından gelen ÖTA'lerin söküm işleminden sonra ortaya çıkan Hulk miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.5), yetkili söküm tesisinden ikincil pazara/markete taşınan yeniden kullanılabilir komponent/materyal miktarının, lisanslı araç toplayıcıları ve araç kullanıcılarından gelen ÖTA'lerin söküm işleminden sonra ortaya çıkan yeniden kullanılabilir komponent/materyal miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.6), yetkili söküm tesisinden geri dönüşüm tesisine taşınan yeniden kullanılamayacak olan komponent/materyal miktarının, lisanslı araç toplayıcıları ve araç kullanıcılarından gelen ÖTA'lerin söküm işleminden sonra ortaya çıkan yeniden kullanılamayacak olan komponent/materyal miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.7), yeniden işleme/parçalama tesisinden bertaraf merkezine taşınan ASR miktarının, yetkili söküm tesisinden gelen Hulk'ların parçalama işleminden sonra ortaya çıkan ASR miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.8), yeniden işleme/parçalama tesisinden geri dönüşüm tesisine taşınan demirli ve demir içermeyen metal miktarının, yetkili söküm tesisinden gelen Hulk'ların parçalama işleminden sonra ortaya çıkan demirli veya demir içermeyen metal miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.9,5.10), geri dönüşüm tesisinden bertaraf merkezine taşınan tehlikeli ve zehirli atık miktarının, yetkili söküm tesisi ve yeniden işleme/parçalama tesisinden gelen komponent/materyallerin geri dönüşüm işlemi sonucu ortaya çıkan tehlikeli ve zehirli atık miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.11,5.12) geri dönüşüm tesisinden ikinci el pazara giden malzemelerin yetkili söküm tesisi ve yeniden işleme/parçalama tesisinden

gelen komponent/materyallerdeki geri dönüştürülebilir malzeme miktarına eşit olma kısıtıdır.

- Kısıt (5.13-5.18) sırasıyla, lisanslı araç toplayıcılarının, yetkili söküm tesislerinin, yeniden işleme/parçalama tesisinin, geri dönüşüm tesisinin ve bertaraf merkezinin kapasitesinin aşılmama durumunu gösteren kısıttır.
- Kısıt (5.19), karar değişkenlerinin negatif olmama kısıtıdır.
- Kısıt (5.20), tesis açma kararını gösteren değişkenlerin alabileceği değerlerin 0 ya da 1 olmasını temin etmektedir.

5.4. Model 2'nin Formülasyonu: Stokastik Programlama

Bu bölümde önerilen tersine lojistik ağın stokastik programlama ile modellenmesi yapılmıştır. Çizelge 5.4 modele ilave edilen indisleri, Çizelge 5.5 modele ilave edilen parametreleri, Çizelge 5.6 modele ilave edilen değişkenleri tanımlamaktadır.

Çizelge 5.4. Modele ilave edilen indisler

İlave indisler	
S	Senaryo

Çizelge 5.5. Modele ilave edilen parametreler

İlave parametreler	
$M_{k,t}$	s senaryosunda k. ÖTA kaynağında kaydı silinen araç miktarı
$P_{k,t}$	s senaryosunun gerçekleşme olasılığı

Çizelge 5.6. Modele ilave edilen değişkenler

İlave değişkenler	
$Q_{k,t}$	senaryo s'de k. kaynak noktasından l. toplama merkezine gönderilen öta miktarı
$Q_{m,t}$	senaryo s'de k. kaynak noktasından m. söküm tesisi t dönemde gönderilen öta miktarı
$Q_{n,t}$	senaryo s'de l. toplama merkezinden m. söküm tesisi t dönemde gönderilen öta miktarı
$Q_{p,t}$	senaryo s'de m. söküm tesisinden n. işleme tesisine t dönemde gönderilen hulk miktarı
$Q_{r,t}$	senaryo s'de m. söküm tesisinden r. geri dönüşüm tesisine t dönemde gönderilen e plastik/cam parça miktarı
$Q_{v,t}$	senaryo s'de m. söküm tesisinden ve i ikincil pazara t dönemde gönderilen e yeniden kullanılabilir parça miktarı
$Q_{w,t}$	senaryo s'de n. işleme tesisi ve p bertaraf tesisine t dönemde gönderilen asr

$$\sum_{\substack{p_1, p_2, p_3, p_4 \in \mathbb{P} \\ p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 2n}} + \sum_{\substack{p_1, p_2, p_3, p_4 \in \mathbb{P} \\ p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 2n}} \leq \frac{1}{2} \sum_{\substack{p_1, p_2, p_3, p_4 \in \mathbb{P} \\ p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 2n}} \frac{1}{p_1 p_2 p_3 p_4} \quad \forall n \geq 1 \quad (5.37)$$

$$\begin{aligned} & \text{?}_{1000} \text{?}_{1000} \text{?}_{100} \text{?}_{1000} \text{?}_{1000} \text{?}_{1000} > 0 & \forall \text{?}_{1000} \text{?}_{1000} \text{?}_{1000} \text{?}_{1000} \text{?}_{1000} \text{?}_{1000} \text{?}_{1000} \\ & \text{?}_2 = \{0, 1\} & \forall \text{?} \end{aligned} \quad (5.38)$$

$\blacklozenge_{??} = \{0,1\}$

Modelin açıklaması şu şekildedir; amaç fonksiyonu 5.21’de toplam maliyet minimize edilmektedir. Oluşturulan amaç fonksiyonu 7 bileşene sahiptir.

Birinci bileşen, bertaraf tesisi sabit kurulum maliyetini göstermektedir. İkinci bileşen, s senaryosunda ağı her aşamasında taşıma maliyetini göstermektedir. Üçüncü bileşen s senaryosunda ÖTA'lerin toplanma maliyetini, dördüncü bileşen s senaryosunda yetkili sökümlük tesisine gönderilen ÖTA'lerin sökümlük maliyetini, beşinci bileşen s senaryosunda yeniden işleme/parçalama tesisine gönderilen Hulk'ların yeniden işleme/parçalama maliyetini, altıncı bileşen s senaryosunda geri dönüşüm tesisine gönderilen parça ve bileşenlerin geri dönüşüm maliyetini ve son olarak yedinci bileşen s senaryosunda geri dönüşüm tesisine gönderilen ASR'lerin ve tehlikeli ve zehirli atıkların elden çıkarma/ bertaraf maliyetini temsil etmektedir.

- Kısıt (5.22), s senaryosunda araç kullanıcılarından, lisanslı araç toplayıcıları ve yetkili söküm tesislerine taşınan ÖTA miktarının, araç kullanıcılarında bulunan toplam ÖTA miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.23), s senaryosunda araç kullanıcılarından lisanslı araç toplayıcılarına taşınan ÖTA miktarının, lisanslı araç toplayıcılarından yetkili söküm tesisine gelen ÖTA miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.24), s senaryosunda yetkili söküm tesisinden yeniden işleme/parçalama tesisine taşınan Hulk miktarının, lisanslı araç toplayıcıları ve i araç kullanıcılarından gelen ÖTA'lerin söküm işleminden sonra ortaya çıkan Hulk miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.25), s senaryosunda yetkili söküm tesisinden ikincil pazara/markete taşınan yeniden kullanılabilir komponent/materyal miktarının, lisanslı araç toplayıcıları ve araç kullanıcılarından gelen ÖTA'lerin söküm işleminden

sonra ortaya çıkan yeniden kullanılabilir komponent/materyal miktarına eşit olma kısıtıdır.

- Kısıt (5.26), s senaryosunda yetkili söküm tesisinden geri dönüşüm tesisine taşınan yeniden kullanılamayacak olan e komponent/materyal miktarının, lisanslı araç toplayıcıları ve araç kullanıcılarından gelen ÖTA'lerin söküm işleminden sonra ortaya çıkan yeniden kullanılamayacak olan komponent/materyal miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.27), s senaryosunda yeniden işleme/parçalama tesisinden bertaraf merkezine taşınan ASR miktarının, yetkili söküm tesisinden gelen Hulk'ların parçalama işleminden sonra ortaya çıkan ASR miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.28), s senaryosunda yeniden işleme/parçalama tesisinden geri dönüşüm tesisine taşınan demirli ve demir içermeyen metal miktarının, yetkili söküm tesisinden gelen Hulk'ların parçalama işleminden sonra ortaya çıkan demirli veya demir içermeyen metal miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.29,5.30), s senaryosunda geri dönüşüm tesisinden bertaraf merkezine taşınan tehlikeli ve zehirli atık miktarının, k yetkili söküm tesisi ve l yeniden işleme/parçalama tesisinden gelen komponent/materyallerin geri dönüşüm işlemi sonucu ortaya çıkan tehlikeli ve zehirli atık miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.31,5.32) s senaryosunda geri dönüşüm tesisinden ikinci el pazara giden malzemelerin yetkili söküm tesisi ve yeniden işleme/parçalama tesisinden gelen komponent/materyallerdeki geri dönüştürülebilir malzeme miktarına eşit olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.34-5.36) sırasıyla s senaryosunda, lisanslı araç toplayıcılarının, yetkili söküm tesislerinin, yeniden işleme/parçalama tesisinin, geri dönüşüm tesisinin ve bertaraf merkezinin kapasitesinin aşılmama durumunu gösteren kısıttır.
- Kısıt (5.37), karar değişkenlerinin negatif olmama kısıtıdır.
- Kısıt (5.38), tesis açma kararını gösteren değişkenlerin alabileceği değerlerin 0 ya da 1 olmasını göstermektedir.

5.5. Model 3'ün Formülasyonu: Robust Programlama

Bu bölümde önerilen tersine lojistik ağ Robust Programlama ile modellenmesi yapılmıştır. Kolaylık sağlaması açısından aşağıdaki dönüşümler yapılmıştır;

$$1. \text{ Tesis Sabit Kurulum Maliyetleri (SKM}_s) = \sum_p \alpha_p$$

$$2. \text{ Ürün Toplama Maliyeti (UPTM}_s) = \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk}$$

$$3. \text{ Ürün Taşıma Maliyetleri (UTM}_s) = \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk}$$

$$4. \text{ Sökme Maliyeti (SM}_s) = \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk}$$

$$5. \text{ Yeniden İşleme Maliyeti (YIM}_s) = \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk}$$

$$6. \text{ Geri Dönüşüm Maliyeti (GDM}_s) = \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk}$$

$$7. \text{ Ürün Bertaraf Maliyeti (UBM}_s) = \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ijk}$$

ve,
Önerilen model:

$$\min \quad \quad \quad (5.39)$$

$$\quad \quad \quad (5.40)$$

$$\quad = \text{SKM}_s + \text{UTM}_s + \text{UPTM}_s + \text{SM}_s + \text{YIM}_s + \text{GDM}_s + \text{UBM}_s$$

Kısıtlar:

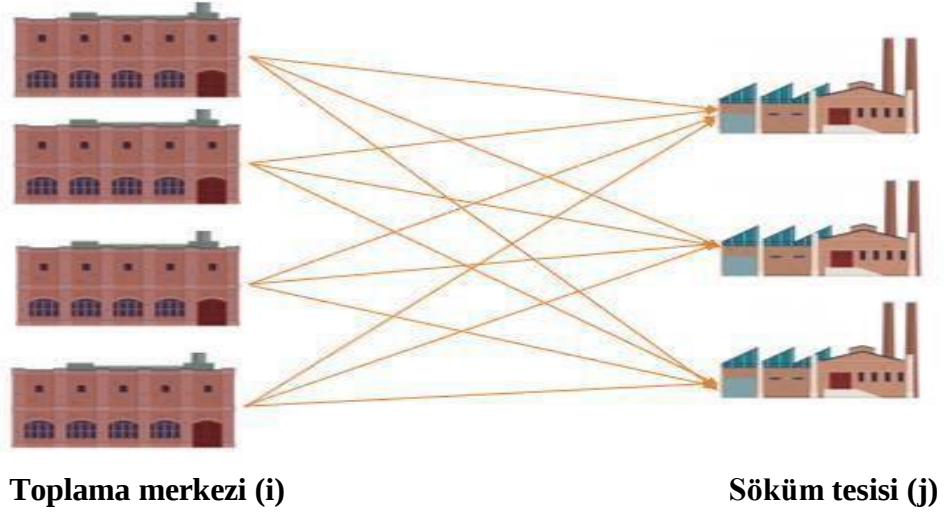
$$(5.22-5.38) \text{ kısıtları} \quad \quad \quad (5.41)$$

Yukarıdaki denklem (5.39)'de her senaryo için optimum çözüm ve robust çözümün maliyetidir. Robust programlamanın ilk aşamasında, her

verileri kullanılarak çözülür ve ile gösterilen her senaryo için en uygun çözümün maliyeti bulunur. İkinci aşamada ise (5.39-5.41) denklemleri çözülür ve robust

5.6. Örnek Uygulama

Bu bölümde miktar belirsizliği altında tersine lojistik ağı için önerilen iki aşamalı stokastik programlama ve robust programlamanın daha iyi anlaşılabilmesi için küçük bir uygulamaya yer verilecektir. Örnek uygulamada İstanbul, İzmir, Edirne, Bursa olmak üzere dört adet toplama merkezi ve Malayta, Diyarbakır, Samsun'da ise üç adet açılması planlanan üç adet söküm tesisi bulunmaktadır. Uygulama için tasarlanan ağ Şekil 5.3'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Örnek uygulama için tasarlanan ağ

Problemin doğrusal programlama modeli;
 c_{ij} : taşıma maliyeti

F_j : tesis açılış maliyeti
 d_{ij} : i ile j arası uzaklık
 q_{ij} : taşınan ürün miktarı

a_i : toplanan ürün miktarı
 y_j : açılıp açılmama kararı (0/1)
 olmak üzere;

$$\min \sum_i \sum_j c_{ij} q_{ij} + \sum_j F_j y_j \quad (5.42)$$

$$\sum_j q_{ij} = a_i \quad \forall i$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n \rho_i \leq a \tag{5.43}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq cap_j \quad (5.44)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (5.45)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad (5.46)$$

Amaç fonksiyonu (5.42)'in birinci bileşeni açılması planlanan söküm tesisinin tesis sabit kurulum maliyeti, ikinci bileşeni ise ağın her aşamasında taşıma maliyetini göstermektedir.

- Kısıt (5.43), toplama merkezinden söküm tesisine taşınan ürün miktarının toplanan ürün miktarından küçük olma kısıtıdır.
- Kısıt (5.44), söküm tesisinin kapasitesinin aşılmama durumunu gösteren kısıttır.
- Kısıt (5.45), karar değişkenlerinin negatif olmama kısıtıdır.
- Kısıt (5.46), tesis açma kararını gösteren değişkenin alabileceği değerlerin 0 ya da 1 olmasını göstermektedir.

5.6.1. İki aşamalı stokastik programlama modeli

Bu bölümde iki aşamalı stokastik programlama modeli formülasyonuna ve sonuçlarına yer verilecektir. Doğrusal programlama modeli olarak tasarlanan ağ miktar belirsizliği altında iki aşamalı stokastik programlama modeline dönüştürülmüştür. Önerilen model;

s : senaryo

c_{ij} : taşıma maliyeti

F_j : tesis açılış maliyeti

d_{ij} : i ile j arası uzaklık

x_{ij}^s : s senaryosunda taşınan ürün miktarı

a_i^s ; s senaryosunda toplanan ürün miktarı

y_j : açılıp açılmama kararı (0/1)
olmak üzere;

$$\min \sum_{i \in I} F_i x_i + \sum_{i \in I, j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (5.47)$$

s.t.

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq a_i \quad (5.48)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq cap_j \quad (5.49)$$

$$x_{ij} \geq 0, x_{ij} \in \{0,1\} \quad (5.50)$$

olarak yazılır. Uygulamada kullanılacak veriler aşağıdaki gibidir.

Söküm tesisleri için kapasiteler Malatya için 1000, Diyarbakır için 700, Samsun için ise 1300 olarak belirlenmiştir. Aşağıdaki Çizelge 5.7-5.10'da sırasıyla toplama merkezleri ile söküm tesisleri arasındaki uzaklık, taşıma maliyetleri, toplanan ürün miktarları ve tesis açılış maliyetleri verilmiştir.

Çizelge 5.7. Toplama merkezleri ile söküm tesisleri arasındaki uzaklık

	MALATYA	DİYARBAKIR	SAMSUN
İSTANBUL	1100	1450	740
EDİRNE	1300	2690	960
İZMİR	1250	1350	1100
BURSA	1270	850	760

Çizelge 5.8. Tesisler arasındaki taşıma maliyetleri

	MALATYA	DİYARBAKIR	SAMSUN
İSTANBUL	0,3	0,5	0,7
EDİRNE	0,2	0,4	0,6
İZMİR	0,4	0,6	0,8
BURSA	0,5	0,3	0,5

Çizelge 5.9. Senaryolara göre toplanan ürün miktarı

	Senaryo
MALATYA	185.000
DİYARBAKIR	125.000
SAMSUN	155.000

Çizelge 5.10. Söküm tesisleri açılış maliyetleri

	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
İSTANBUL	180	200	270
EDİRNE	120	140	235
İZMİR	150	170	248
BURSA	130	150	250

İki aşamalı stokastik programlama modeli için taşıma maliyetleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Çizelge 5.11 taşıma maliyetlerini göstermektedir. Burada (1,1)'in açılımı 1. toplama merkezi ile 1. söküm tesisi arasındaki taşıma maliyeti olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 5.11. Hesaplanan taşıma maliyetleri

(i,j)		Toplam taşıma maliyeti	
(1,1)	$c_{11} d_{11} x_{11}$	$0,3.1100. x_{11}$	$330x_{11}$
(1,2)	$c_{12} d_{12} x_{12}$	$0,5.1450. x_{12}$	$725x_{12}$
(1,3)	$c_{13} d_{13} x_{13}$	$0,7.740. x_{13}$	$518x_{13}$
(2,1)	$c_{21} d_{21} x_{21}$	$0,2.1300. x_{21}$	$260x_{21}$
(2,2)	$c_{22} d_{22} x_{22}$	$0,4.2690. x_{22}$	$1076x_{22}$
(2,3)	$c_{23} d_{23} x_{23}$	$0,6.960. x_{23}$	$576x_{23}$
(3,1)	$c_{31} d_{31} x_{31}$	$0,4.1250. x_{31}$	$500x_{31}$
(3,2)	$c_{32} d_{32} x_{32}$	$0,6.1350. x_{32}$	$810x_{32}$
(3,3)	$c_{33} d_{33} x_{33}$	$0,8.1100. x_{33}$	$880x_{33}$
(4,1)	$c_{41} d_{41} x_{41}$	$0,5.1270. x_{41}$	$635x_{41}$
(4,2)	$c_{42} d_{42} x_{42}$	$0,3.850. x_{42}$	$255x_{42}$
(4,3)	$c_{43} d_{43} x_{43}$	$0,5.760. x_{43}$	$380x_{43}$

Buradan hesaplanacak olan iki aşamalı stokastik programlama model amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\min 330x_{11} + 725x_{12} + 518x_{13} + 260x_{21} + 1076x_{22} + 576x_{23} + 500x_{31} + 810x_{32} + 880x_{33}$$

$$+ 635x_{41} + 255x_{42} + 380x_{43} + F_j. y_j \quad (5.51)$$

y_j açılması planlanan söküm tesisi olmak üzere (y_1, y_2, y_3) sırasıyla Malatya, Diyarbakır ve Samsun'daki söküm tesislerini göstermektedir. Çizelge 5.12 karar değişkenlerinin aldığı değerleri göstermektedir.

Çizelge 5.12. Karar değişkenleri değerleri

(x_1, x_2, x_3)	Karar	$(x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10})$
(0,0,0)	Hiçbir tesisin açılmama durumu	(0,0,0,0,0,0,0,0)
(1,0,0)	Yalnızca Malatya'daki söküm tesisinin açılması	(1,0,0,1,0,0,1,0,0)
(0,1,0)	Yalnızca Diyarbakır'daki söküm tesisinin açılması	(0,1,0,0,1,0,0,1,0)
(0,0,1)	Yalnızca Samsun'daki söküm tesisinin açılması	(0,0,1,0,0,1,0,0,1)
(1,0,1)	Malatya ve Samsun'daki söküm tesisinin açılması	(1,0,1,1,0,1,1,0,1)
(1,1,0)	Malatya ve Diyarbakır'daki söküm tesisinin açılması	(1,1,0,1,1,0,1,1,0)
(0,1,1)	Diyarbakır ve Samsun'daki söküm tesisinin açılması	(0,1,1,0,1,1,0,1,1)
(1,1,1)	Tüm tesislerin açılması durumu	(1,1,1,1,1,1,1,1,1)

(1,0,0) için toplam maliyet aşağıdaki gibi hesaplanır.

Malatya'daki söküm tesisinin açılma maliyeti $F_1 = 185.000$ TL ve tesis kapasitesi 1000 adettir.

$$\begin{aligned} \text{Senaryo1}(180,120,150,130) &= 330x_{11} + 260x_{21} + 500x_{31} + 635x_{41} \\ &= 180.330 + 120.260 + 150.500 + 130.635 \\ &= 59.980 + 31.200 + 75.000 + 82.550 = 248.730 \text{ TL} \end{aligned}$$

$$F_1 + = 330x_{11} + 260x_{21} + 500x_{31} + 635x_{41} = 185.000 + 248.730 = 433.730 \text{ TL}$$

$$\begin{aligned} \text{Senaryo2}(200,140,170,150) &= 330x_{11} + 260x_{21} + 500x_{31} + 635x_{41} \\ &= 200.330 + 140.260 + 170.500 + 150.635 \\ &= 66.000 + 36.400 + 85.000 + 95.250 = 282.650 \text{ TL} \end{aligned}$$

$$F_1 + 330x_{11} + 260x_{21} + 500x_{31} + 635x_{41} = 185.000 + 282.650 = 467.650 \text{ TL}$$

Senaryo3(270,235,248,250) = Senaryo 3'te toplanan ürün miktarı 270+235+248+250=1003 adettir.

F_1 söküm tesisinin kapasitesi 1000 adet olduğundan çözüm olursuzdur. Çizelge 5.13 de hesaplanan amaç fonksiyonu değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.13. Hesaplanan amaç fonksiyonu değerleri

$$\min 330x_{11} + 25x_{12} + 518x_{13} + 435x_{21} + 255x_{22} + 430x_{23} + 6x_{31} + 500x_{32} + 880x_{33} + 635x_4 + 255x_5 + 380x_6 + 418x_7$$

		41	42	43	j	j
(x_1, x_2, x_3)	F_{x_1, x_2, x_3}	Senaryo1	Senaryo2	Senaryo3	$F_{x_1, x_2, x_3} + E[Q(x, s)]$	
(0,0,0)	-	-	-	-	-	
(1,0,0)	$F_1 = 185.000$	433.730	467.650	-	-	
(0,1,0)	$F_2 = 125.000$	539.270	596.590	-	-	
(0,0,1)	$F_3 = 155.000$	498.760	545.840	743.460	596.020	
(1,0,1)	$F_1 + F_3 = 340.000$	508.750	535.650	647.950	564.116	
(1,1,0)	$F_1 + F_2 = 310.000$	555.000	584.400	709.200	616.200	
(0,1,1)	$F_2 + F_3 = 380.000$	597.010	640.190	819.850	685.683	
(1,1,1)	$F_1 + F_2 + F_3 = 465.000$	663.750	690.650	802.950	719.117	

(- : olursuz çözüm)

Çizelge 5.13 incelendiğinde minimum değer 433.730 TL ve açılması planlanan söküm tesisi Malatya ve Samsun dur. Diğer bir değer olan α^* beklenen değer, her optimal değerleri senaryo için Çizelge 5.13’de verilen minimum değerdir.

Çizelge 5.14’de verilmiştir.

$$\alpha^* = \min_{j \in J} F_j$$

Çizelge 5.14. Optimal α^* değerleri		
1	2	3
433.730	467.650	647.950

5.6.2. Robust programlama modeli

Bu bölümde robust programlama modeli formülasyonuna ve sonuçlarına yer verilecektir. Miktar belirsizliği altında iki aşamalı stokastik programlama modeli robust programlama modeline dönüştürülmüştür. Önerilen model,

$$\min \delta \quad (5.52)$$

$$\delta = \alpha^* - \alpha \quad (5.53)$$

$$\alpha = \sum_{j \in J} F_j \cdot y_j + \sum_{i \in I} c_{is} d_{ij} x_{ij} \quad (5.54)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq b_j \quad (5.55)$$

$$\sum_{\mathbf{v} \in \mathcal{V}} \mathbf{v} \leq \text{cap}(\mathbf{v}). \quad (5.56)$$

$$\mathbf{v} \geq 0, \mathbf{v} \in \{0,1\} \quad (5.57)$$

Çizelge 5.13’de verilen amaç fonksiyonu değerleri ve Çizelge 5.14’de verilen α^* değerleri kullanılarak hesaplanan α ve α^* değerleri Çizelge 5.15’de verilmiştir.

Çizelge 5.15. α ve α^* değerleri						
	α	α	α	α	α	α
(0,0,1)	498.760	545.840	743.460	65.030	78.200	95.510
(1,0,1)	508.750	535.650	647.950	75.020	68.000	0
(1,1,0)	555.000	584.400	709.200	121.270	116.750	61.250
(0,1,1)	597.010	640.190	819.850	163.280	172.540	171.900
(1,1,1)	663.750	690.650	802.950	230.020	223.000	155.000

Çizelge 5.15 incelendiğinde optimal α değerleri için α^* robust çözümün

α^*

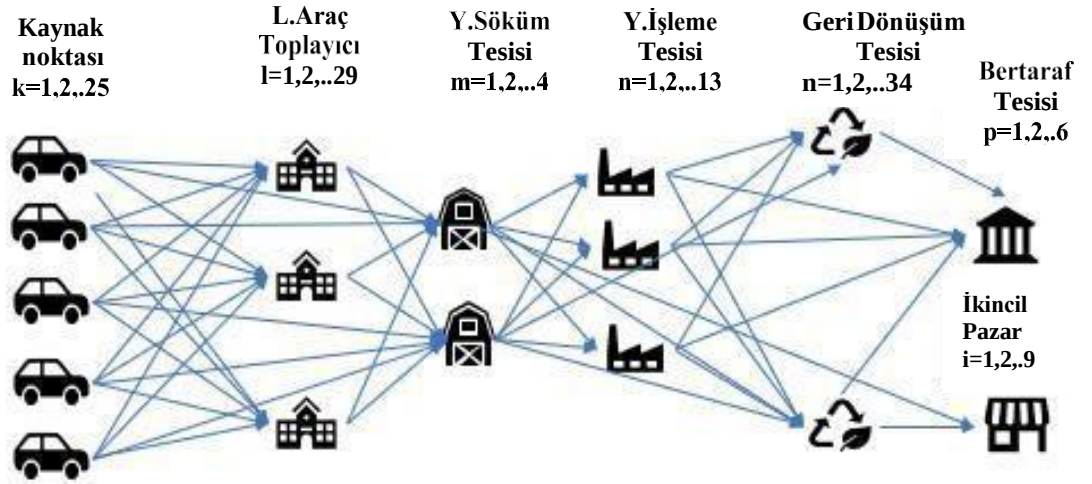
minimum sapma miktarının bulunması gerekir. (1,0,1)’da bulunan değerler, 75.020, 68.000 ve 0 minimum sapmayı veren değerlerdir. Diğer değerler incelendiğinde sapma miktarının daha fazla olduğu kolayca görülebilir. Aynı zamanda açılması planlanan söküm tesisi Malatya ve Samsun’dur.

Ele alınan problem için önerilen iki aşamalı stokastik programlama modeli ve robust programlama modeli sonuçları incelendiğinde her iki modelde de açılması planlanan söküm tesisinin Malatya ve Samsun olduğu görülmektedir.

6. UYGULAMA

6.1. Ömrünü Tamamlamış Araçlar İçin Geliştirilen Modelin Yapısı ve Uygulamada Kullanılacak Veriler

Geliştirilen model, kaynak noktaları, lisanslı araç toplayıcıları, yetkili söküm tesisleri, yeniden işleme tesisleri, geri dönüşüm tesisleri, bertaraf tesisleri ve ikincil pazarlarından oluşmaktadır. Model kapsamında, hangi yetkili söküm tesisinin açılacağı, ağın her aşamasında taşınan ürün miktarları kararları alınacaktır. Bu kararlar alınırken aynı zamanda toplam maliyette minimize edilecektir. Modelin kısıtları tesisler arasında taşınan miktar kısıtları, kapasite kısıtları ve karar değişkenlerinin tam sayı olma ve negatif olmama kısıtlarıdır. Ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü için önerilen tersine lojistik ağ yapısı Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1.ÖTA geri dönüşüm tersine lojistik ağ yapısı

Tez kapsamında Bölüm 5’de ayrıntılı olarak verilmiş olan tersine lojistik ağ tasarımı uygulamasının ÖTA’ların geri dönüşümü için yapılması ve modelin uygulamasının Türkiye’de yapılması kararlaştırılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan veriler literatür araştırmaları, Türkiye İstatistik Kurumu ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından sağlanmıştır. Türkiye’de trafiğe kayıtlı araç sayısı her geçen gün artmakta olup 2019 yılsonu itibariyle 22.865.921’dir. Öte yandan

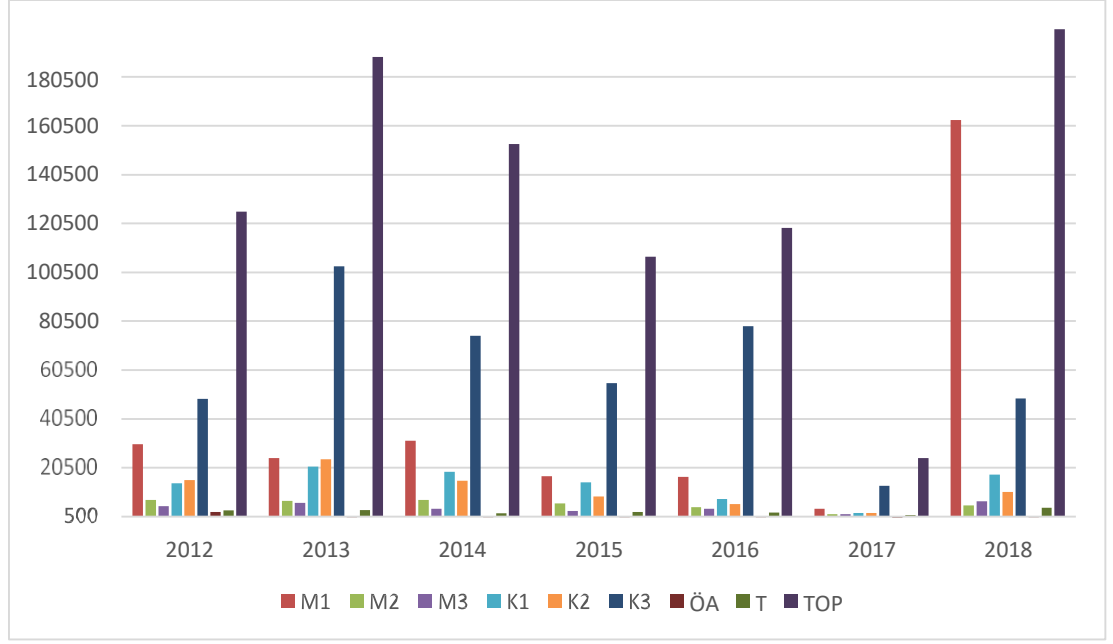
trafikten kaydı silinen araç sayısı 2019 yılsonu itibariyle 256.298'dir. Trafığe kayıtlı araçların ve trafikten kaydı silinen araçların büyük bir kısmını M1 kategorisinde yer alan otomobiller oluşturmaktadır. Çizelge 6.1.'de 2012-2018 yılları arasında trafiğe kayıtlı araç sayıları ve Çizelge 6.2. ve Şekil 6.2'de 2012-2018 yılları arasında trafikten kaydı silinen araç sayıları ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 6.1. 2012-2018 yılları arasında trafiğe kayıtlı araç sayıları

YIL	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
M1	8 648 875	9 283 923	9 857 915	10 589 337	11 317 998	12 035 978	12 398 190
M2	396 119	421 848	427 264	449 213	463 933	478.618	487 527
M3	2 657 722	2 722 826	2 828 466	2 938 364	3 003 733	3 102 800	3 211 328
K1	2 794 606	2 933 050	3 062 479	3 255 299	3 442 483	3 642 625	3 755 580
K2	751 650	755 950	773 728	804 319	825 334	838 718	845 462
K3	235 949	219 885	211 200	217 056	220 361	221 885	218 523
Ö.A.	33 071	36 148	40 731	45 732	50 818	60 099	63 359
T	1 515 421	1 565 817	1 626 938	1 695 152	1 765 764	1 838 222	1 885 952
TOP.	17.033.41	17.939.447	18.828.721	19.994.472	21.090.424	22.2' 8.945	22.865.921
M1: Otomobil M2: Minibüs M3: Motosiklet		K1: Kamyon K2: Kamyonet K3: Otobüs		Ö.A.: Özel Amaç		T: Traktör	

Çizelge 6.2. 2012-2018 yılları arasında trafikten kaydı silinen araç sayıları

YIL	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
M1	30027	24413	31 589	17 039	16 735	3 602	162 901
M2	7 231	6843	7 240	5 858	4 268	1 456	5 096
M3	4 630	6061	3 576	2 720	3 597	1 371	6 720
K1	14 141	20942	18 795	14 532	7 619	1 859	17 649
K2	15 424	23944	15 099	8 777	5 520	1 959	10 614
K3	48 694	102995	74 466	55 157	78 430	13 065	48 851
Ö.A.	2 350	427	448	484	448	98	465
T	2 910	3039	1 841	2 271	2 041	1 057	4 002
TOP.	125.407	188.664	153.054	106.838	118.658	24.467	256.298



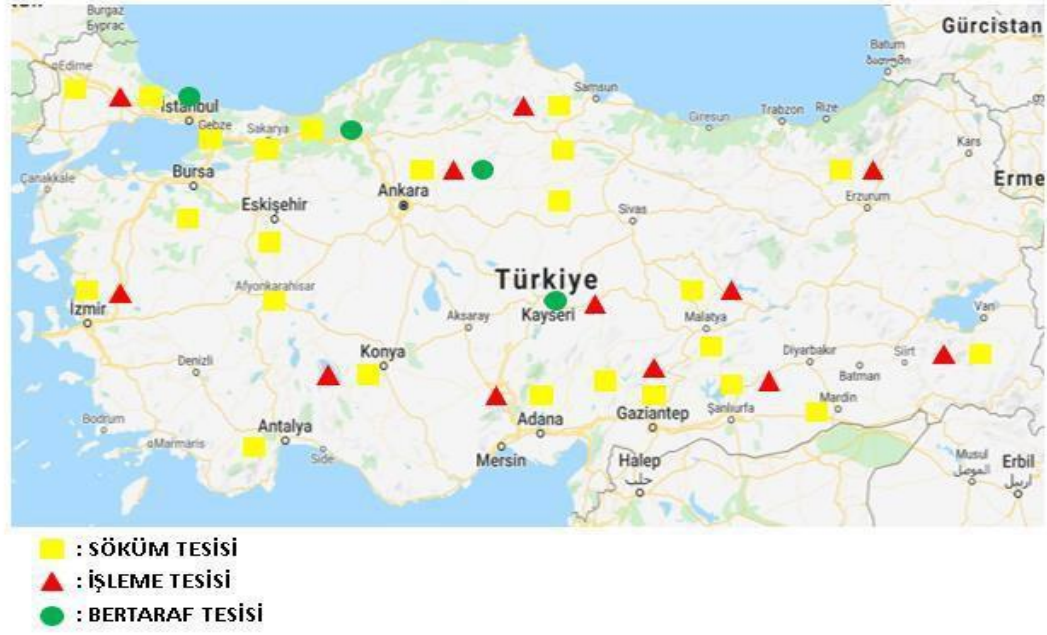
Şekil 6.2. Trafikten Kaydı Silinen Araç Sayısı

Türkiye, 36° - 42° Kuzey enlemleri ile 26° - 45° Doğu boylamları arasında yer alır. 783.562 km² 'lik bir alana sahip olan Türkiye'nin 81 adet ili bulunmaktadır ve bu illerin hepsi ÖTA kaynağı olarak kabul edilmiştir.

2019 yılı itibari ile Çevre ve Şehircilik Bakanlığı onaylı Türkiye'de hizmet veren 81 adet lisanslı araç toplayıcıları, 81 adet yetkili söküm tesisi ve 14 adet işleme tesisi, 16 adet geri dönüşüm tesisi ve 6 adet elden çıkarma/bertaraf tesisi modele eklenmiştir. Çizelge 6.3'de modele dahil edilen veriler ve Şekil 6.3'de bu firmaların konumları yer almaktadır.

Çizelge 6.3. Modele dahil edilen veriler

Tesis Adı	Adet
Lisanslı Toplama Merkezi	81
Yetkili Söküm Tesisi	35
İşleme Tesisi	14
Geri Dönüşüm Tesisi	16
Elden çıkarma/Bertaraf Tesisi	6



Şekil 6.3. Modele dahil edilen veriler

Aşağıda Çizelge 6.4, Çizelge 6.5, Çizelge 6.6 ve Çizelge 6.7 'da modele dahil edilen sırasıyla tesis kapasiteleri, maliyetler ve 2006 yılında yapılmış olan ve günümüzde de güncel olarak kabul edilen araç parça/malzeme ağırlıkları verilmiştir.

Çizelge 6.4. Tesis kapasiteleri

Tesis Adı	TON
Araç toplayıcı	3000
Söküm tesisi	4000
İşleme tesisi	8000
Geri Dönüşüm Tesisi	11000
Elden çıkarma/Bertaraf Tesisi	25000

Çizelge 6.5. Malzeme miktarları

Malzeme	Kodu	Ağırlık
Hulk miktarı	e1	810
ASR miktarı	e2	185
yeniden kullanılabilir malzeme miktarı	e3	137
yeniden kullanılamayan malzeme miktarı	e4	864
Geri dönüştürülebilir malzeme miktarı	e5	815
Bertaraf miktarı	e6	150

Çizelge 6.6. Maliyetler

Tesis Adı	TL
Söküm tesisi açılış maliyeti	625 000
Sökme maliyeti	490
İşleme maliyeti	135
Bertaraf etme maliyeti	500
Geri dönüşüm maliyeti	250
Toplama merkezi ÖTA toplama maliyeti	200
Söküm tesisi ÖTA toplama maliyeti	100
ÖTA taşıma maliyeti	1
Toplama merkezleri ile söküm tesisleri arasındaki taşıma maliyeti	0,4
Hulk taşıma maliyeti	0,2
ASR taşıma maliyeti	0,5

Çizelge 6.7. ÖTA Bileşimi(GHK,2006)

Malzeme	Kodu	Ağırlık
Demirli metal	b_1	650
Demir dışı metal	b_2	90
Plastik	b_3	120
Lastik	b_4	30
Cam	b_5	30
Akü	b_6	13
Sıvılar	b_7	17
Tekstil	b_8	10
Kauçuk	b_9	20
Diğer	b_{10}	20
Toplam		1000

6.2. Box-Jenkins ile Modelleme

4. bölümde ayrıntılı şekilde verilen Box-Jenkins ile modellemesi yapılmıştır.

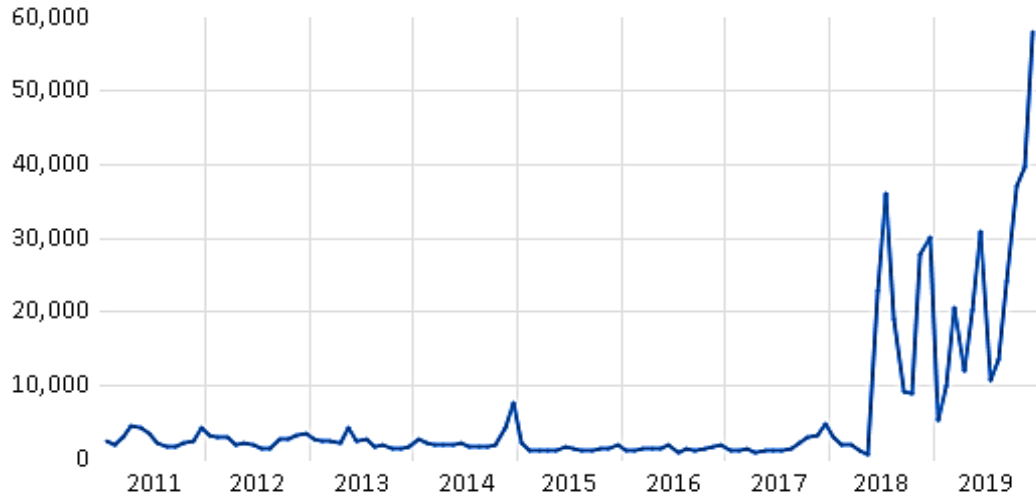
Dört basamak şeklinde verilmiş olan adımlar uygulanmıştır.

İlk olarak 2011-2019 yılı aylık trafikten kaydı silinen araç verileri kullanılarak 2020-2024 yılları için tahmin yapılmıştır. Kullanılan veriler Türkiye İstatistik Kurumu'ndan alınmıştır. Çizelge 6.8.'de modele dahil edilen veri seti yer almaktadır.

Çizelge 6.8. Modele dahil edilen veri seti

Ay / Yıl	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Ocak	2472	3135	2588	2612	2306	1063	1110	3034	5206
Şubat	1825	2871	2368	2185	1214	1271	1115	1999	9947
Mart	2936	3048	2575	1881	1245	1367	1377	1985	20579
Nisan	4428	2008	2125	1823	1095	1306	1025	1046	11979
Mayıs	4295	2238	4229	2041	1146	1485	1037	774	20383
Haziran	3401	1871	2580	2143	1629	1866	1284	22913	31016
Temmuz	2216	1326	2828	1656	1295	843	1068	36113	10702
Ağustos	1713	1499	1696	1674	1226	1368	1296	19057	13690
Eylül	1729	2724	2021	1656	1101	1147	2182	9275	24156
Ekim	2248	2652	1403	2048	1398	1529	3086	8849	37070
Kasım	2575	3215	1548	4242	1438	1659	3315	27679	39588
Aralık	4170	3440	1803	7628	1946	1831	4715	30177	58112

Box-Jenkins modellerinin seçilmesindeki ana amaç, kısa dönemli tahminlerde başarılı sonuç sağlamak istenmesidir. Durağanlık testi için Genişletilmiş Dickey-Fuller (ADF) birim kök testi kullanılmaktadır.



Şekil 6.4. Modele dahil edilen veri seti

Yıllara göre çizilmiş olan aylık ÖTA verilerinin grafiği incelendiğinde verilerin durağan olmadığı açıkça görülmektedir. Dickey-Fuller testinde 2. fark işlemi sonucunda **Prob.** değeri 0.000 çıkmaktadır. Yani 2. fark işlemi sonucunda veriler durağandır. Buradan d katsayısı 2 olarak bulunmaktadır. Aşağıdaki Çizelge 6.9’da farklı ARIMA(p,d,q) değerleri için elde edilen Schwarz Criterion, determinasyon katsayısı değerleri görülmektedir.

Çizelge 6.9. Schwarz Criterion değerleri

	Schwarz criterion	R ²	Adjusted R ²	SEE
ARIMA(1,2,1)	20.35971	0.484818	0.469665	5826.123
ARIMA(2,2,1)	20.15210	0.604471	0.588807	5130.122
ARIMA(2,2,2)	20.19203	0.605356	0.585624	5149.940
ARIMA(1,2,2)	20.32103	0.525217	0.506413	5620.647
ARIMA(3,2,1)	20.19521	0.604550	0.584778	5155.191
ARIMA(3,2,2)	20.23157	0.607447	0.583656	5162.153
ARIMA(3,2,3)	20.25738	0.618243	0.590975	5116.580
ARIMA(4,2,1)	20.19586	0.624253	0.601480	5050.443
ARIMA(5,2,1)	20.23681	0.618304	0.591040	5116.173

ARIMA(p,d,q) modelinde p, d ve q değerlerini belirlemekte kesin bir yöntem bulunmamaktadır. Literatüre bakıldığında çoğunlukla farklı p, d ve q değerleri için ARIMA modelleri oluşturularak elde edilen modellerden en küçük Schwarz Criterion değerine sahip olan model seçilerek tahminler bu modelle yapılmaktadır. Farklı p, d ve q değerleri için deneyler yapılmış olup bu deneylere ait veriler incelendiğinde en uygun Schwarz Criterion değeri p=2 ve q=1 olarak bulunmuştur. ARIMA(2,2,1) için 2020-2024 yılları tahminleri aşağıdaki Çizelge 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.10. 2020-2024 tahmin veri seti

ÖTA	2020	2021	2022	2023	2024
Ocak	62059	68833	75608	82382	89156
Şubat	62624	69398	76172	82947	89721
Mart	63188	69962	76737	83511	90285
Nisan	63753	70527	77301	84076	90850
Mayıs	64317	71092	77866	84640	91414
Haziran	64882	71656	78430	85205	91979
Temmuz	65446	72221	78995	85769	92544
Ağustos	66011	72785	79559	86334	93108
Eylül	66575	73350	80124	86898	93673
Ekim	67140	73914	80688	87463	94237
Kasım	67704	74479	81253	88027	94802
Aralık	68269	75043	81818	88592	95366

6.3. Ağın Deterministik Programlama ile Tasarımı ve Sonuçları

Bu bölümde Çizelge 6.10'da tahmin edilmiş verilerin deterministik programlama ile çözümlerine yer verilmiştir. Deterministik modelde 81 adet ilin hepsinin öta kaynağı olduğu varsayılmıştır. ÖTA sayılarının il bazında dağılımı

aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir. 2020 yılında Türkiye'deki toplam tahmin edilen ÖTA sayısı 781968 ve 2020 yılı itibariyle nüfus 83.154.997 olarak kabul edilmiştir. 2020 yılı il verileri göz önünde bulundurularak ÖTA sayıları illere dağıtılmıştır. Çizelge 6.11'de 2020 yılına ait Türkiye il bazlı nüfus ile orantılı olarak hesaplanan ÖTA sayıları verilmiştir.

Çizelge 6.11. 2020 Yılı Kaydı Silinen Araç Sayıları

İL	NÜFUS	ARAÇ	İL	NÜFUS	ARAÇ
İstanbul	15.519.267	145.939	Ağrı	536.199	5042
Ankara	5.639.076	53028	Çorum	530.864	4992
İzmir	4.367.251	41068	Şırnak	529.615	4980
Bursa	3.056.120	28739	Giresun	448.400	4217
Antalya	2.511.700	23619	Isparta	444.914	4184
Adana	2.237.940	21045	Yozgat	421.200	3961
Konya	2.232.374	20993	Aksaray	416.367	3915
Şanlıurfa	2.073.614	19500	Edirne	413.903	3892
Gaziantep	2.069.364	19460	Muş	408.809	3844
Kocaeli	1.953.035	18366	Düzce	392.166	3688
Mersin	1.840.425	17307	Kastamonu	379.405	3568
Diyarbakır	1.756.353	16516	Uşak	370.509	3484
Hatay	1.628.894	15318	Niğde	362.861	3412
Manisa	1.440.611	13547	Kırklareli	361.836	3403
Kayseri	1.407.409	13235	Bitlis	348.115	3274
Samsun	1.348.542	12681	Rize	343.212	3227
Balıkesir	1.228.620	11554	Amasya	337.800	3177
K.Maraş	1.154.102	10853	Siirt	330.280	3106
Van	1.136.757	10690	Bolu	316.126	2973
Aydın	1.110.972	10447	Nevşehir	303.010	2849
Denizli	1.037.208	9754	Kars	285.410	2684
Sakarya	1.029.650	9683	Kırıkkale	283.017	2661
Tekirdağ	1.055.412	9925	Hakkâri	280.991	2642
Muğla	983.142	9245	Bingöl	279.812	2631
Eskişehir	887.475	8346	Yalova	270.976	2548
Mardin	838.778	7888	Burdur	270.796	2546
Trabzon	808.974	7607	Karaman	253.279	2382
Malatya	800.165	7525	Karabük	248.458	2336
Erzurum	762.062	7166	Kırşehir	242.938	2285
Ordu	754.198	7092	Erzincan	234.747	2207
Afyonk.	729.483	6860	Bilecik	219.427	2063
Sivas	638.956	6009	Sinop	218.243	2052
Adıyaman	626.465	5891	Iğdır	199.442	1876
Tokat	612.747	5762	Bartın	198.249	1864

Batman	608.659	5724	Çankırı	195.789	1841
İL	NÜFUS	ARAÇ	İL	NÜFUS	ARAÇ
Zonguldak	596.053	5605	Artvin	170.875	1607
Elazığ	591.098	5559	Gümüşhane	164.521	1547
Kütahya	579.257	5447	Kilis	142.490	1340
Çanakkale	542.157	5098	Ardahan	97.319	915
Osmaniye	538.759	5066	Bayburt	84.843	798
			Tunceli	84.660	796

2021-2024 yıllarına ait Türkiye il bazlı nüfus ile orantılı olarak hesaplanan ÖTA sayıları EK-1’de verilmiştir. Geliştirilen deterministik programlama modelinin sonuçları Çizelge 6.12’de verilmiştir.

Tüm veriler derlendikten ve model oluşturulduktan sonra model GAMS 24.8.3(General Algebraic Modeling System) programı ile çözülmüştür.

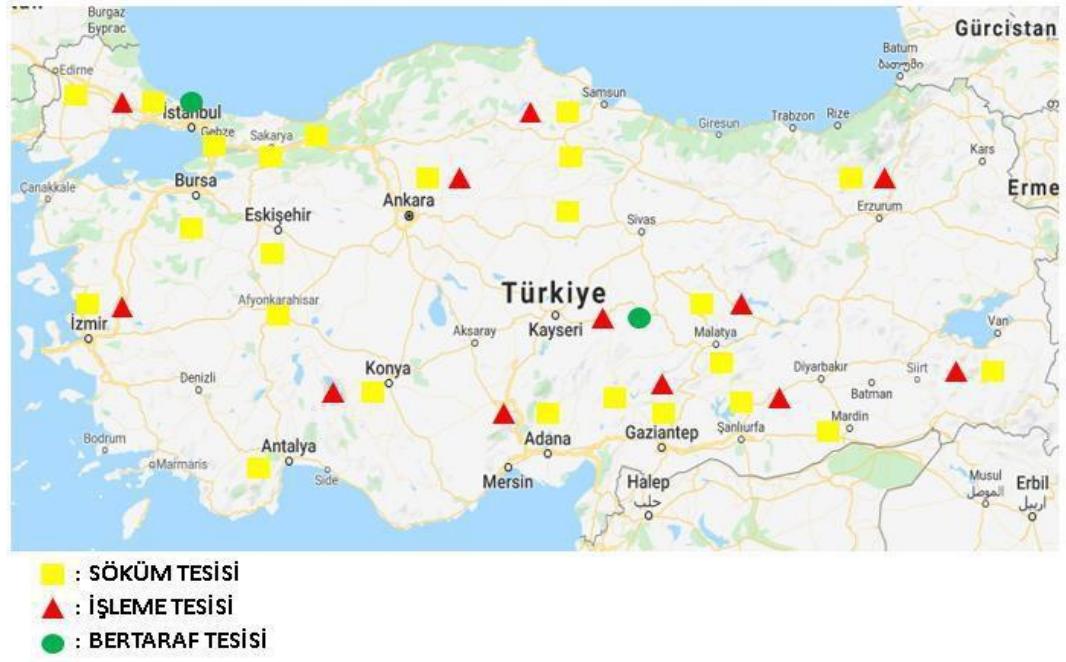
Çizelge 6.12. Deterministik Programlama Modeli Sonuçları

Deterministik Programlama					
	2020	2021	2022	2023	2024
Amaç Fonk.	981.528.871	1.029.185.881	1.126.681.795	1.224.189.305	1.321.693.436

Aşağıdaki Şekil 6.5’de açılması planlanan bertaraf tesisinin konumu gösterilmektedir.

Çizelge 6.13. Deterministik programlama açılan tesisler

Model	Bertaraf Tesisi (p)			
	İstanbul	Sakarya	Ankara	Kayseri
Deterministik Model	*			*



Şekil 6.5. Açılan bertaraf tesisi

6.4. Ağın İki Aşamalı Stokastik Programlama ile Tasarımı ve Sonuçları

Ele alınan problemde son kullanıcılardan gelen ürün miktarı belirsiz olduğu varsayılmış ve bu parametre için yirmibeş adet senaryo üretilmiştir. Yirmibeş adet senaryonun üretilmesinde her yıl için tahmin edilen verilerden faydalanılarak alt ve üst sınır belirlenmiş ve dağılımın uniform dağılıma uyduğu

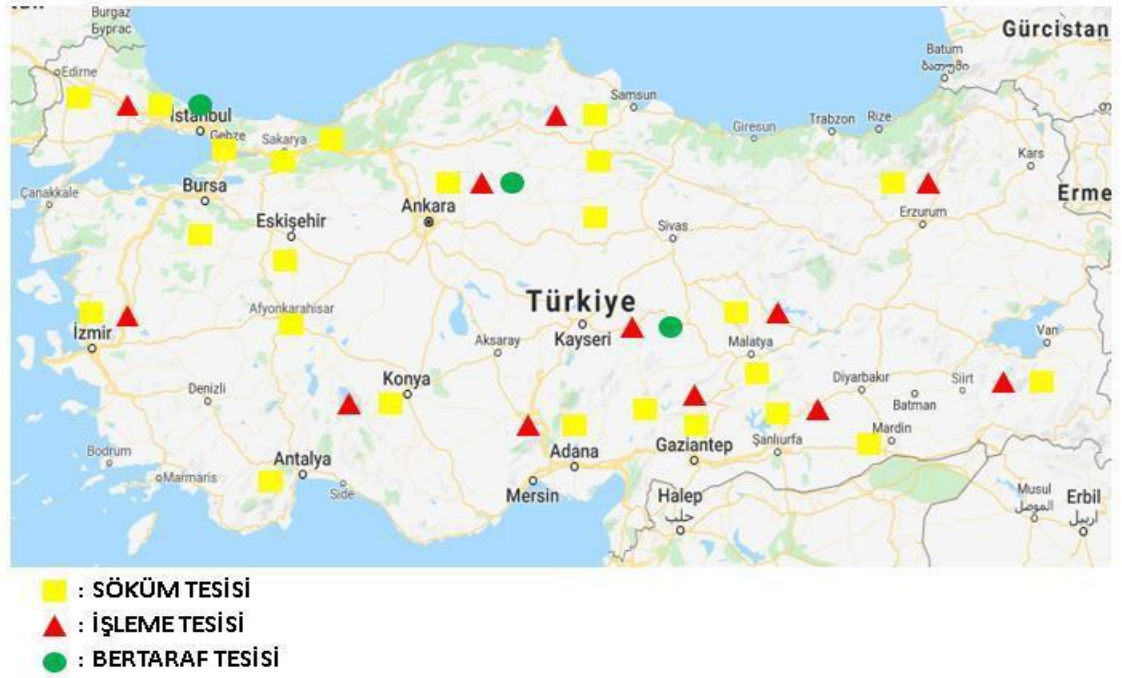
varsayılmıştır. 25 senaryonun gerçekleşme olasılıkları ise $\frac{1}{25} = 0.04$ şeklindedir. Geliştirilen iki aşamalı stokastik programlama modelinin çözümü aşağıdaki Çizelge 6.14’de verilmiştir.

Çizelge 6.14. İki aşamalı stokastik programlama modeli sonuçları

Çizelge 6.15 incelendiğinde açılması planlanan bertaraf tesisi İstanbul, Ankara ve Kayseri’de olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.15. İki aşamalı stokastik programlama açılan tesisler

Model	Bertaraf Tesisi (p)	
	İstanbul	Sakarya
	*	

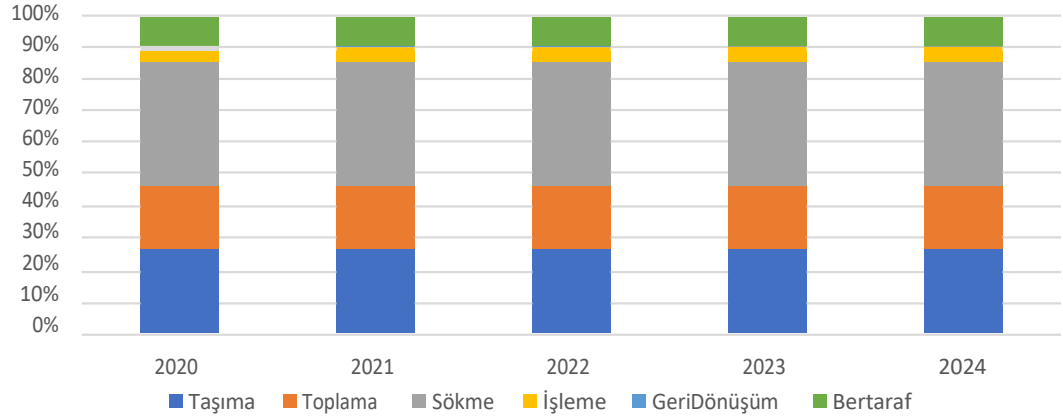


Şekil 6.6. Stokastik programlama açılan bertaraf tesisi

Her yıl için maliyet bileşenlerinin ayrıntılı değerleri Çizelge 6.18’de verilmektedir. Bu çizelgedeki tüm değerler senaryoların beklenen değeridir. Benzer şekilde, Çizelge 6.18’de her bir senaryo için toplam maliyet bileşenlerini göstermektedir. Bu değerler, 5 yıl boyunca karşılık gelen maliyet değerlerinin toplanmasıyla bulunur. Bu çizelge, iki aşamalı stokastik programlama ve robust optimizasyon yönteminin sonuçlarını karşılaştırmak için kullanılacaktır.

Çizelge 6.16. Maliyet kalemleri

	Maliyetler	TL
2020	Taşıma	257.271.600
	Toplama	184.670.400
	Sökme	377.035.400
	İşleme	84.140.450
	GeriDönüşüm	2.750.819
	Bertaraf	58.477.040
2021	Taşıma	302.727.700
	Toplama	219.617.000
	Sökme	448.384.800
	İşleme	100.063.000
	Geri Dönüşüm	3.271.378
	Bertaraf	69.543.110
2022	Taşıma	325.843.700
	Toplama	230.200.100
	Sökme	469.991.800
	İşleme	72.894.290
	Geri Dönüşüm	3.429.022
	Bertaraf	104.884.900
2023	Taşıma	363.905.900
	Toplama	254.635.900
	Sökme	519.881.700
	İşleme	80.632.060
	Geri Dönüşüm	3.793.014
	Bertaraf	116.018.500
2024	Taşıma	380.740.700
	Toplama	266.884.600
	Sökme	544.889.300
	İşleme	84.510.660
	Geri Dönüşüm	3.975.467
	Bertaraf	121.599.300



Şekil 6.7. Maliyetler

Şekil 6.7, iki aşamalı stokastik programlama yönteminin 5 yıllık toplam maliyeti oluşturan bileşenleri göstermektedir. Şekil 6.7'e göre, geri dönüşüm maliyetinin en düşük maliyette olduğu ve sökme maliyetinin her yıl için en fazla olduğu açıkça görülmektedir. 5 yıl boyunca toplam maliyette yavaş bir artış vardır ve bu artma eğiliminin nedeni, toplanan öta miktarındaki artıştır. Toplanan öta miktarı arttığında, toplam maliyet ve maliyet bileşenleri de bu doğrultuda artmaktadır.

6.5. Ağın Robust Programlama ile Tasarımı ve Sonuçları

Geliştirilen iki aşamalı stokastik programlama modelinin sonuçları modele dahil

*
değerleri aşağıdaki Çizelge 6.19'de verilmiştir. Tüm veriler edilen Q_s derlendikten ve model oluşturulduktan sonra model GAMS 24.8.3 programı ile çözülmüştür.

	2020	2021	2022	2023	2024
	Çizelge 6.17. Q* değerleri				
1	937.162.400	1.053.526.000	1.189.452.000	1.306.868.000	1.405.363.000
2	967.255.000	1.106.333.000	1.222.552.000	1.318.218.000	1.408.796.000
3	956.229.900	1.055.516.000	1.217.693.000	1.328.571.000	1.380.695.000
4	960.996.400	1.060.383.000	1.194.775.000	1.291.977.000	1.425.224.000
5	941.583.000	1.104.679.000	1.219.103.000	1.308.629.000	1.405.548.000
6	1.015.472.000	1.016.748.000	1.201.619.000	1.294.208.000	1.449.192.000
7	940.110.700	1.095.720.000	1.213.956.000	1.323.654.000	1.423.911.000
8	1.002.597.000	1.112.225.000	1.170.456.000	1.294.945.000	1.423.312.000
9	946.597.400	1.042.657.000	1.202.674.000	1.321.900.000	1.416.181.000
10	948.494.900	1.055.994.000	1.194.246.000	1.301.088.000	1.401.414.000
11	969.967.100	1.106.471.000	1.181.380.000	1.315.189.000	1.424.166.000
12	943.118.600	1.115.071.000	1.200.175.000	1.310.195.000	1.437.897.000
13	938.220.600	1.061.113.000	1.199.218.000	1.317.081.000	1.399.656.000
14	1.008.618.000	1.055.013.000	1.201.002.000	1.313.194.000	1.415.684.000
15	1.036.011.000	1.024.695.000	1.172.994.000	1.309.714.000	1.405.515.000
16	952.772.500	1.039.750.000	1.188.951.000	1.300.544.000	1.417.069.000
17	943.193.300	1.025.303.000	1.204.934.000	1.293.567.000	1.419.990.000
18	950.160.100	1.031.536.000	1.217.645.000	1.305.447.000	1.412.104.000
19	997.417.800	1.068.571.000	1.189.856.000	1.326.175.000	1.372.566.000
20	1.013.758.000	1.071.103.000	1.209.145.000	1.326.885.000	1.396.199.000
21	956.091.400	1.078.050.000	1.186.150.000	1.302.523.000	1.383.195.000
22	985.615.100	1.130.387.000	1.199.488.000	1.303.448.000	1.378.485.000
23	969.621.600	1.100.399.000	1.190.788.000	1.284.950.000	1.376.503.000
24	964.951.400	1.038.524.000	1.165.095.000	1.299.041.000	1.430.465.000
25	964.345.800	1.143.607.000	1.207.244.000	1.338.867.000	1.402.600.000

6.5.1. 2020 yılı için ağırlık robust programlama ile tasarımı ve sonuçları

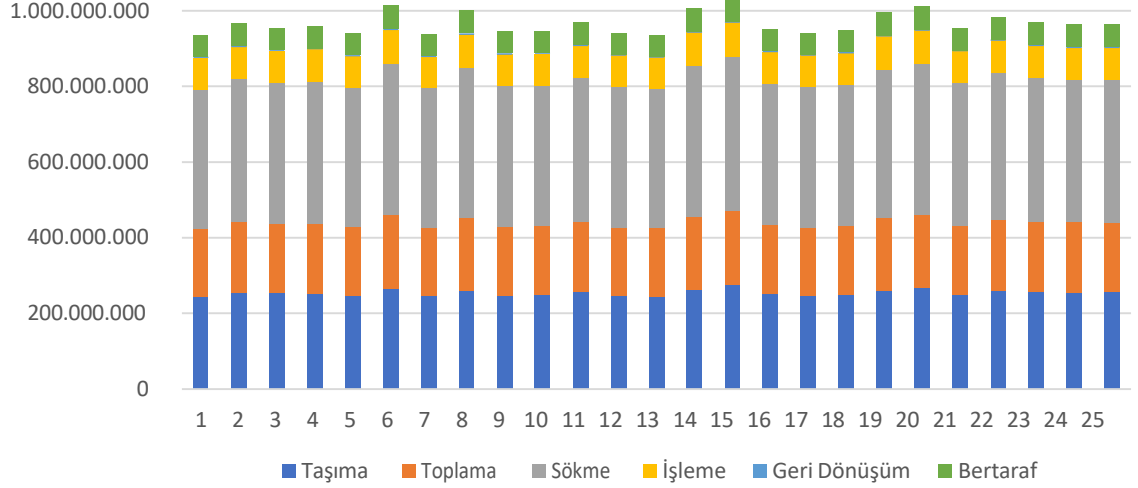
Bu bölümde, ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü için ters lojistik ağı tasarımı probleminin 2020 yılı baz alınarak robust programlama yöntemi ile çözülen problemin sonuçları yer almaktadır. Robust programlama yöntemi

5.295.950 sıfır olmayan eleman, 36525 tek denklem, 845.005 tek değişken ve 4 ayrık değişken olmakla beraber 44038 iterasyonla gerçekleşmiştir. Taşıma, toplama, sökme, işleme, geri dönüşüm ve bertaraf maliyetleri 25 senaryo için Çizelge 6.18’da gösterilmektedir.

Çizelge 6.18. 2020 yılı maliyetleri

	Taşıma	Toplama	Sökme	İşleme	Geri D.	Bertaraf
1	242.661.400	180.971.300	369.483.000	82.455.040	2.695.718	57.305.690
2	255.655.600	185.437.000	378.600.500	84.489.710	2.762.238	58.719.770
3	254.071.600	182.971.200	373.566.200	83.366.250	2.725.508	57.938.970
4	251.617.200	184.857.100	377.416.600	84.225.530	2.753.600	58.536.160
5	247.563.500	180.845.500	369.226.300	82.397.740	2.693.844	57.265.860
6	265.044.500	195.577.900	399.304.900	89.110.190	2.913.296	61.930.970
7	246.400.000	180.764.900	369.061.600	82.361.000	2.692.643	57.240.330
8	260.406.700	193.426.600	394.912.600	88.129.980	2.881.249	61.249.730
9	246.770.400	182.362.300	372.323.100	83.088.830	2.716.438	57.746.170
10	248.136.700	182.501.000	372.606.300	83.152.040	2.718.505	57.790.090
11	258.817.100	185.319.600	378.360.800	84.436.240	2.760.489	58.682.610
12	246.694.300	181.473.600	370.508.600	82.683.910	2.703.200	57.464.750
13	243.701.300	180.976.100	369.492.800	82.457.230	2.695.789	57.307.210
14	261.567.500	194.695.900	397.504.200	88.708.330	2.900.157	61.651.680
15	273.581.400	198.712.600	405.704.800	90.538.410	2.959.989	62.923.570
16	251.364.000	182.775.400	373.166.400	83.277.020	2.722.591	57.876.960
17	245.033.200	181.927.000	371.434.200	82.890.470	2.709.953	57.608.310
18	248.172.700	182.926.600	373.475.100	83.345.910	2.724.843	57.924.840
19	259.454.600	192.322.600	392.658.600	87.626.970	2.864.804	60.900.140
20	266.598.200	194.724.500	397.562.500	88.721.340	2.900.583	61.660.720
21	248.607.900	184.362.000	376.405.700	83.999.940	2.746.225	58.379.380
22	258.992.300	189.360.700	386.611.500	86.277.480	2.820.685	59.962.260
23	258.860.300	185.218.100	378.153.600	84.389.990	2.758.977	58.650.460
24	255.490.400	184.878.500	377.460.200	84.235.260	2.753.919	58.542.930
25	255.681.500	184.670.400	377.035.400	84.140.450	2.750.819	58.477.040

Çizelge 6.18 incelendiğinde taşıma, toplama, sökme, işleme ve geri dönüşüm maliyeti en düşük senaryo 18, en yüksek senaryo 20’de olduğu görülmektedir. Çizelge 6.18’de tüm maliyetlerin toplamının toplam maliyet satırındaki toplamı vermemesinin sebebi tesis kurulum maliyetlerinin eklenmemiş olmasıdır.



Şekil 6.8. 2020 yılı senaryolara göre toplam maliyet

Yukarıdaki Şekil 6.8, Çizelge 6.18’de verilen değerleri grafik olarak göstermektedir. Robust optimizasyon yönteminin çözümüne göre senaryoların toplam maliyetleri arasındaki farklar rahatça görülebilir. En büyük maliyet yirmi beş senaryoda da sökme maliyeti ve en düşük maliyet ise geri dönüşüm maliyetidir.

6.5.2. 2021 yılı için ağır robust programlama ile tasarımı ve sonuçları

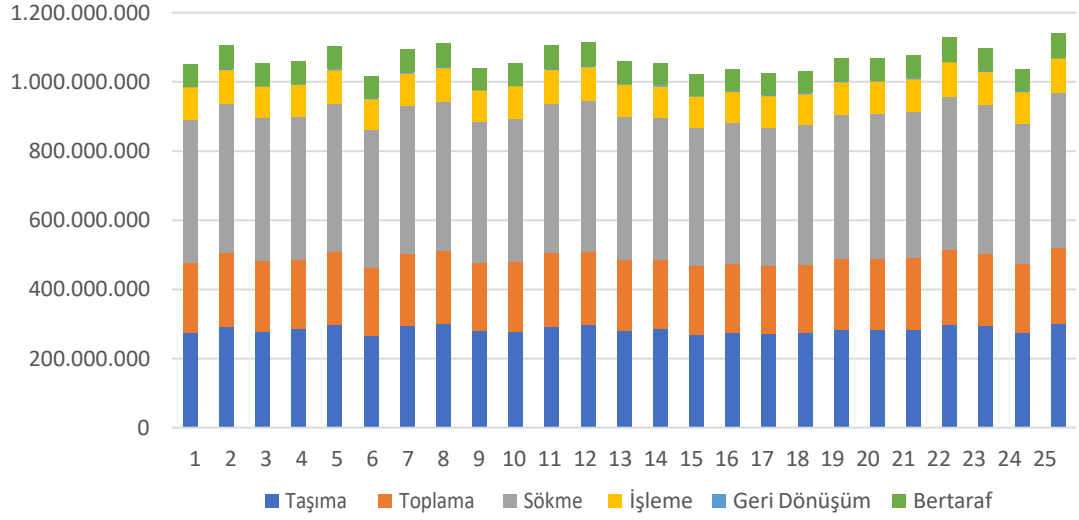
Bu bölümde, Türkiye için ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü için ters lojistik ağ tasarım probleminin 2021 yılı için robust programlama yöntemi kullanılarak çözülen problemin sonuçları yer almaktadır. Robust programlama yönteminin sonuçlarında, 5.295.950 sıfır olmayan eleman, 36525 tek denklem, 845.005 tek değişken ve 4 ayrık değişken olmakla beraber 38082 iterasyonla gerçekleşmiştir. Taşıma, toplama, sökme, işleme, geri dönüşüm ve bertaraf maliyetleri 2021 yılında 25 senaryo için Çizelge 6.19’de gösterilmektedir. Değerler TL cinsinden verilmiştir.

Çizelge 6.19. 2021 yılı maliyetleri

	Taşıma	Toplama	Sökme	İşleme	Geri D.	Bertaraf
1	274.246.700	203.067.800	414.596.800	92.522.780	3.024.864	64.302.700
2	291.757.000	212.286.500	433.418.200	96.723.030	3.162.184	67.221.840
3	278.659.000	202.435.200	413.305.200	92.234.540	3.015.441	64.102.370
4	285.314.200	201.968.200	412.351.700	92.021.740	3.008.484	63.954.480
5	298.111.400	210.194.900	429.147.900	95.770.040	3.131.027	66.559.520
6	266.808.100	195.405.100	398.952.100	89.031.460	2.910.722	61.876.250
7	294.198.200	208.877.000	426.457.300	95.169.600	3.111.397	66.142.220
8	299.991.300	211.674.700	432.169.200	96.444.290	3.153.071	67.028.120
9	279.060.000	198.972.000	406.234.500	90.656.620	2.963.853	63.005.730
10	277.489.400	202.865.500	414.183.800	92.430.600	3.021.850	64.238.630
11	293.006.900	211.996.100	432.825.300	96.590.710	3.157.858	67.129.880
12	296.049.200	213.447.600	435.788.800	97.252.060	3.179.479	67.589.520
13	280.917.500	203.307.100	415.085.400	92.631.810	3.028.428	64.378.470
14	285.466.900	200.525.800	409.406.800	91.364.550	2.986.998	63.497.740
15	269.395.900	196.804.800	401.809.800	89.669.190	2.931.571	62.319.470
16	275.339.800	199.184.400	406.668.100	90.753.390	2.967.016	63.072.990
17	271.748.000	196.349.300	400.879.800	89.461.640	2.924.786	62.175.230
18	274.158.300	197.347.700	402.918.200	89.916.540	2.939.658	62.491.380
19	284.075.000	204.430.300	417.378.600	93.143.560	3.045.159	64.734.140
20	282.641.800	205.465.900	419.492.900	93.615.410	3.060.586	65.062.070
21	284.373.900	206.827.900	422.273.700	94.235.970	3.080.874	65.493.350
22	297.729.300	217.009.000	443.060.000	98.874.710	3.232.529	68.717.240
23	293.692.600	210.231.100	429.221.900	95.786.550	3.131.567	66.571.000
24	274.417.000	199.105.200	406.506.400	90.717.310	2.965.837	63.047.910
25	300.963.400	219.617.000	448.384.800	98.963.000	3.271.378	69.543.110

Çizelge 6.19 incelendiğinde taşıma maliyeti en düşük senaryo 12, en yüksek senaryo 19'da toplama, sökme, işleme ve geri dönüşüm maliyeti ise en düşük senaryo 6, en yüksek senaryo 19'da olduğu görülmektedir.

Aşağıdaki Şekil 6.9, Çizelge 6.19’de verilen değerleri grafik olarak göstermektedir. Robust optimizasyon yönteminin çözümüne göre senaryoların toplam maliyetleri arasındaki farklar rahatça görülebilir. En büyük maliyet yirmi beş senaryoda da sökme maliyeti ve en düşük maliyet ise geri dönüşüm maliyetidir.



Şekil 6.9. 2021 yılı senaryolara göre toplam maliyet

6.3.3. 2022 yılı için ağıın robust programlama ile tasarımı ve sonuçları

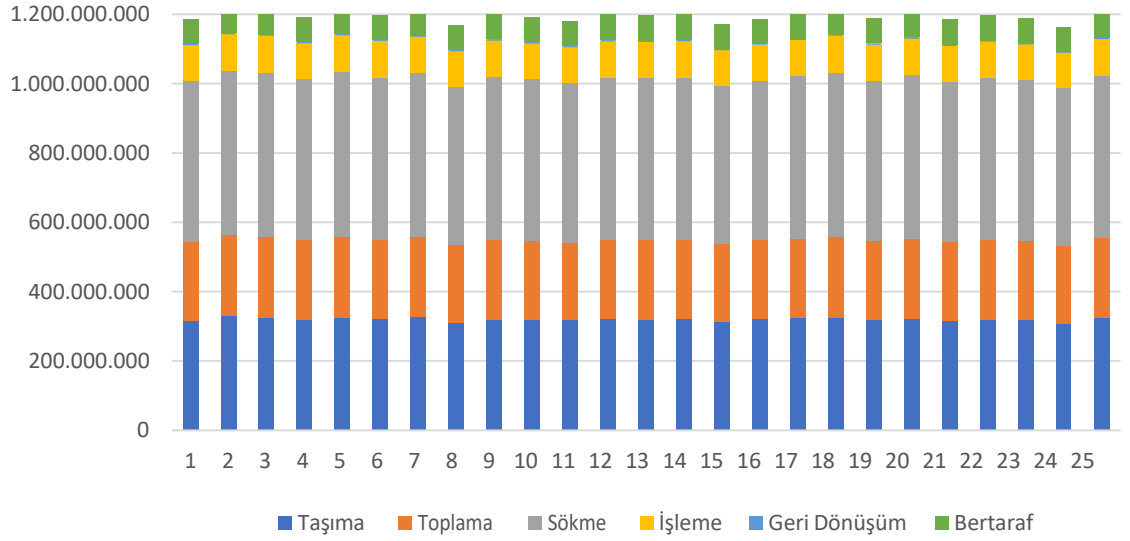
Bu bölümde, Türkiye için ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü için ters lojistik ağ tasarım probleminin 2020 yılı için robust programlama yöntemi kullanılarak çözülen problemin sonuçları yer almaktadır.

Robust programlama yönteminin sonuçlarında, 5.295.950 sıfır olmayan eleman, 36525 tek denklem, 845.005 tek değişken ve 4 ayrık değişken olmakla beraber 50838 iterasyonla gerçekleşmiştir. Taşıma, toplama, sökme, işleme, geri dönüşüm ve bertaraf maliyetleri 2022 yılında 25 senaryo için Çizelge 6.20de gösterilmektedir. Değerler TL cinsinden verilmiştir.

Çizelge 6.20. 2022 yılı maliyetleri

	Taşıma	Toplama	Sökme	İşleme	Geri D.	Bertaraf
1	316.498.400	227.478.200	464.434.700	103.644.800	3.388.477	72.032.410
2	329.541.100	232.716.700	475.130.000	106.031.600	3.466.509	73.691.200
3	325.274.800	232.561.900	474.813.900	105.961.000	3.464.203	73.642.190
4	320.655.300	227.782.800	465.056.500	103.783.500	3.393.014	72.128.850
5	324.718.300	233.075.500	475.862.500	106.195.000	3.471.854	73.804.820
6	320.159.900	229.699.700	468.970.200	104.656.900	3.421.568	72.735.840
7	326.696.600	231.214.600	472.063.100	105.347.100	3.444.133	73.215.540
8	310.984.900	223.957.000	457.245.500	102.040.400	3.336.025	70.917.370
9	319.349.500	230.186.900	469.964.900	104.878.900	3.428.825	72.890.110
10	318.566.900	228.190.100	465.888.100	103.969.100	3.399.081	72.257.820
11	317.197.500	225.187.400	459.757.700	102.601.000	3.354.354	71.307.010
12	321.391.800	229.000.800	467.543.300	104.338.500	3.411.157	72.514.530
13	319.910.100	229.137.800	467.823.100	104.400.900	3.413.199	72.557.930
14	320.618.000	229.418.900	468.396.900	104.529.000	3.417.385	72.646.920
15	313.961.200	223.842.500	457.011.700	101.988.200	3.334.320	70.881.120
16	322.201.100	225.858.000	461.126.700	102.906.600	3.364.343	71.519.350
17	323.143.100	229.786.300	469.147.100	104.696.400	3.422.858	72.763.270
18	325.136.800	232.585.400	474.861.900	105.971.700	3.464.553	73.649.630
19	319.410.200	226.823.300	463.097.500	103.346.400	3.378.721	71.825.010
20	322.111.700	231.155.500	471.942.500	105.320.200	3.443.254	73.196.840
21	316.092.900	226.721.800	462.890.300	103.300.100	3.377.209	71.792.860
22	320.034.000	229.176.000	467.901.000	104.418.300	3.413.767	72.570.010
23	318.548.400	227.291.800	464.054.000	103.559.800	3.385.700	71.973.360
24	308.177.500	223.290.000	455.883.700	101.736.500	3.326.090	70.706.170
25	323.868.900	230.200.100	469.991.800	104.884.900	3.429.022	72.894.290

Çizelge 6.20 incelendiğinde taşıma maliyeti en düşük senaryo 24, en yüksek senaryo 2’de toplama, sökme, işleme ve geri dönüşüm maliyeti ise en düşük senaryo 24, en yüksek senaryo 5’te olduğu görülmektedir. Aşağıdaki Şekil 6.10, Çizelge 6.19’de verilen değerleri grafik olarak göstermektedir. Robust optimizasyon yönteminin çözümüne göre senaryoların toplam maliyetleri arasındaki farklar rahatça görülebilir. En büyük maliyet yirmi beş senaryoda da sökme maliyeti ve en düşük maliyet ise geri dönüşüm maliyetidir.



Şekil 6.10. 2022 yılı senaryolara göre toplam maliyet

6.5.4. 2023 yılı için ağıın robust programlama ile tasarımı ve sonuçları

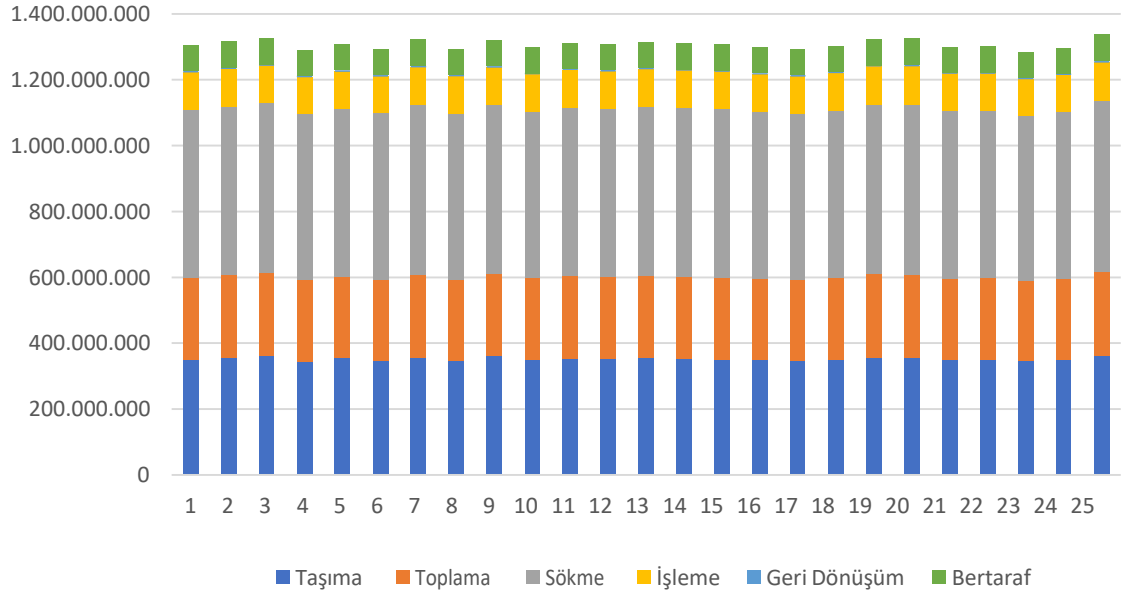
Bu bölümde, Türkiye için ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü için ters lojistik ağ tasarım probleminin 2023 yılı için robust programlama yöntemi kullanılarak çözülen problemin sonuçları yer almaktadır. Robust programlama yönteminin sonuçlarında, 5.295.950 sıfır olmayan eleman, 36525 tek denklem, 845.005 tek değişken ve 4 ayrık değişken olmakla beraber 51013 iterasyonla gerçekleşmiştir.

Taşıma, toplama, sökme, işleme, geri dönüşüm ve bertaraf maliyetleri 2023 yılında 25 senaryo için Çizelge 6.21’de gösterilmektedir. Değerler TL cinsinden verilmiştir.

Çizelge 6.21. 2023 yılı maliyetleri

	Taşıma	Toplama	Sökme	İşleme	Geri D.	Bertaraf
1	350.959.600	249.121.200	508.622.400	113.505.800	3.710.867	78.885.780
2	356.155.600	250.728.500	511.904.000	114.238.200	3.734.809	79.394.740
3	361.252.300	252.101.300	514.706.800	114.863.600	3.755.258	79.829.450
4	345.528.900	246.650.400	503.577.900	112.380.100	3.674.063	78.103.390
5	353.780.100	248.844.500	508.057.500	113.379.800	3.706.745	78.798.160
6	346.075.500	247.090.300	504.476.100	112.580.500	3.680.616	78.242.690
7	356.373.000	252.091.400	514.686.700	114.859.200	3.755.112	79.826.330
8	346.118.700	247.271.500	504.846.000	112.663.100	3.683.315	78.300.070
9	360.297.900	250.608.200	511.658.500	114.183.400	3.733.018	79.356.670
10	350.059.100	247.846.800	506.020.500	112.925.200	3.691.884	78.482.240
11	352.991.500	250.763.800	511.976.000	114.254.200	3.735.335	79.405.910
12	352.737.300	249.525.800	509.448.600	113.690.200	3.716.895	79.013.920
13	354.832.000	250.777.200	512.003.400	114.260.400	3.735.535	79.410.170
14	352.351.900	250.409.800	511.253.300	114.092.900	3.730.062	79.293.820
15	350.137.200	250.079.300	510.578.500	113.942.400	3.725.139	79.189.170
16	348.751.400	248.046.200	506.427.700	113.016.100	3.694.855	78.545.390
17	347.016.000	246.677.300	503.632.800	112.392.300	3.674.463	78.111.900
18	350.509.900	248.867.500	508.104.500	113.390.300	3.707.089	78.805.460
19	357.091.100	252.562.300	515.648.100	115.073.700	3.762.126	79.975.440
20	355.253.800	253.227.600	517.006.300	115.376.800	3.772.036	80.186.100
21	349.721.500	248.309.800	506.965.800	113.136.100	3.698.780	78.628.840
22	349.075.100	248.720.200	507.803.700	113.323.100	3.704.894	78.758.790
23	344.664.200	245.041.000	500.292.000	111.646.800	3.650.089	77.593.750
24	349.291.200	247.512.700	505.338.500	112.773.000	3.686.908	78.376.450
25	361.843.600	254.635.900	519.881.700	116.018.500	3.793.014	80.632.060

Çizelge 6.21 incelendiğinde taşıma, toplama, sökme, işleme ve geri dönüşüm maliyeti ise en düşük senaryo 23, en yüksek senaryo 25’de olduğu görülmektedir. Aşağıdaki Şekil 6.11, Çizelge 6.21’de verilen değerleri grafik olarak göstermektedir. Robust optimizasyon yönteminin çözümüne göre senaryoların toplam maliyetleri arasındaki farklar rahatça görülebilir. En büyük maliyet yirmi beş senaryoda da sökme maliyeti ve en düşük maliyet ise geri dönüşüm maliyetidir.



Şekil 6.11. 2023 yılı senaryolara göre toplam maliyet

6.5.5. 2024 yılı için ağırlıkta robust programlama ile tasarımı ve sonuçları

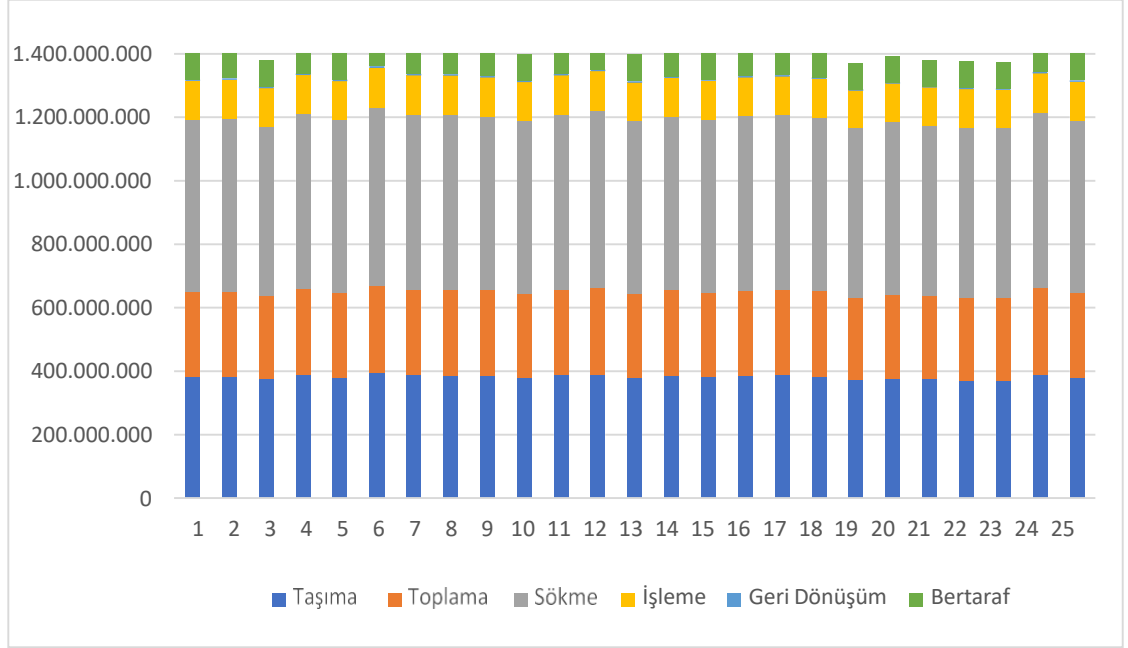
Bu bölümde, Türkiye için ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü için ters lojistik ağ tasarım probleminin 2020 yılı için robust programlama yöntemi kullanılarak çözülen problemin sonuçları yer almaktadır. Robust programlama yönteminin sonuçlarında, 5.295.950 sıfır olmayan eleman, 36525 tek denklem, 845.005 tek değişken ve 4 ayrık değişken olmakla beraber 52011 iterasyonla gerçekleşmiştir. Taşıma, toplama, sökme, işleme, geri dönüşüm ve bertaraf maliyetleri 2024 yılında 25 senaryo için Çizelge 6.22’de gösterilmektedir. Değerler TL cinsinden verilmiştir.

Çizelge 6.22. 2024 yılı maliyetleri

	Taşıma	Toplama	Sökme	İşleme	Geri D.	Bertaraf
1	381.203.900	266.943.100	545.008.900	121.626.000	3.976.340	84.529.210
2	383.768.500	267.169.900	545.471.900	121.729.300	3.979.718	84.601.020
3	375.327.000	262.035.400	534.988.900	119.389.900	3.903.235	82.975.130
4	389.359.700	270.000.200	551.250.500	123.018.900	4.218.785	85.497.260
5	378.776.400	267.625.400	546.401.900	121.936.800	3.986.503	84.745.270
6	395.666.900	274.612.800	560.667.800	125.120.500	4.090.586	86.957.860
7	387.689.200	270.093.600	551.441.100	123.061.400	4.023.269	85.526.830
8	386.289.800	270.302.600	551.867.900	123.156.600	4.026.383	85.593.020
9	386.159.200	268.474.300	548.135.100	122.323.600	3.999.148	85.014.070
10	378.029.600	266.740.800	544.595.800	121.533.800	3.973.326	84.465.140
11	387.189.800	270.290.600	551.843.400	123.151.200	4.026.204	85.589.220
12	389.869.800	273.176.900	557.736.100	124.466.200	4.069.197	86.503.170
13	378.363.000	266.194.600	543.480.600	121.284.900	3.965.189	84.292.170
14	386.509.400	268.253.000	547.683.300	122.222.800	3.995.852	84.944.000
15	380.856.000	267.073.700	545.275.400	121.685.400	3.978.285	84.570.550
16	384.088.300	269.247.100	549.712.900	122.675.700	4.010.660	85.258.780
17	387.307.900	269.169.100	549.553.600	122.640.200	4.009.498	85.234.080
18	383.320.900	268.150.800	547.474.500	122.176.200	3.994.329	84.911.630
19	373.576.200	260.369.500	531.587.800	118.630.900	3.878.420	82.447.640
20	375.864.500	265.944.200	542.969.500	121.170.800	3.961.461	84.212.910
21	376.023.100	262.506.500	535.950.700	119.604.500	3.910.250	83.124.320
22	369.869.500	262.883.500	536.720.500	119.776.300	3.915.860	83.243.710
23	368.927.700	262.611.800	536.165.800	119.652.500	3.911.822	83.157.680
24	390.143.000	271.164.500	553.627.500	123.549.300	4.039.220	85.865.930
25	378.665.100	266.884.600	544.889.300	121.599.300	3.975.467	84.510.660

Çizelge 6.22 incelendiğinde taşıma maliyeti en düşük senaryo 12, en yüksek senaryo 19'da toplama, sökme, işleme ve geri dönüşüm maliyeti ise en düşük senaryo 6, en yüksek senaryo 19'da olduğu görülmektedir.

Aşağıdaki Şekil 6.12, Çizelge 6.22’de verilen değerleri grafik olarak göstermektedir. Robust optimizasyon yönteminin çözümüne göre senaryoların toplam maliyetleri arasındaki farklar rahatça görülebilir. En büyük maliyet yirmi beş senaryoda da sökme maliyeti ve en düşük maliyet ise geri dönüşüm maliyetidir.



Şekil 6.12. 2024 yılı senaryolara göre toplam maliyet

6.6. Modellerin Karşılaştırılması

Bu bölümde ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümü için kurulan tersine lojistik ağın iki aşamalı stokastik programlama ve robust programlama yöntemi sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.23. Modellerin karşılaştırılması

	Deterministik Programlama	Stokastik Programlama	Robust Programlama
2020	981.528.871	989.345.800	967.449.280
2021	1.029.185.881	1.143.607.000	1.070.595.960
2022	1.126.681.795	1.207.243.882	1.196.273.640
2023	1.224.189.305	1.338.867.030	1.255.609.972
2024	1.321.693.436	1.407.600.028	1.402.018.200

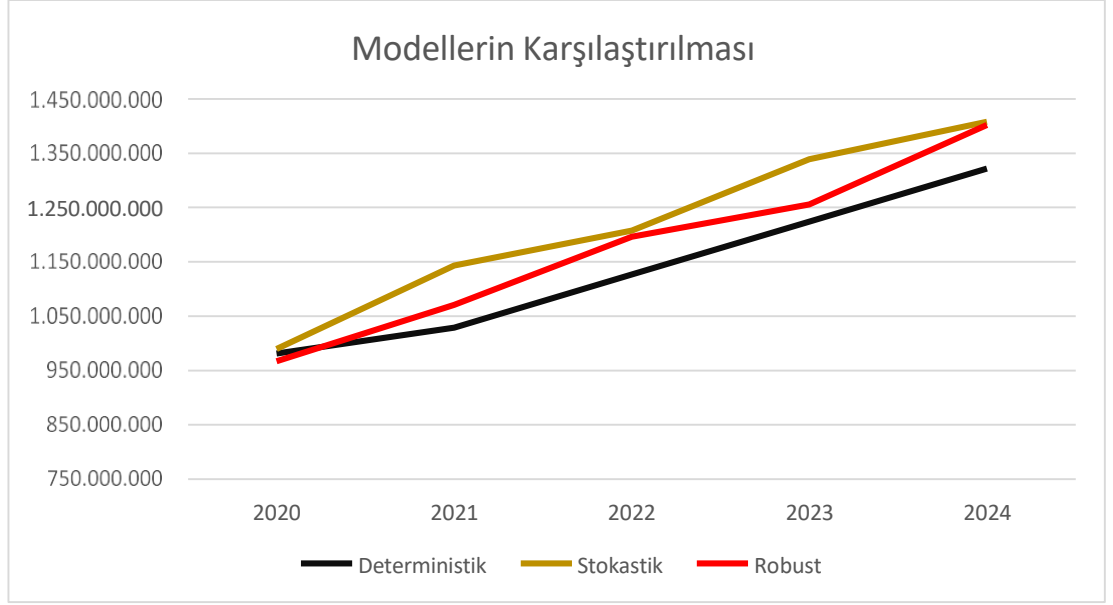
Çizelge 6.23 incelendiğinde 2020 yılı için deterministik model değeri 981.528.871 TL, stokastik model 989.345.800 TL ve robust model ise 967.449.280 TL olarak hesaplanmıştır. Bu değerler göz önüne alındığında iki aşamalı stokastik programlama modelinin robust modele göre 21.896.520 TL daha fazla sapma göstermiştir.

2021 yılı için deterministik model değeri 1.029.185.881 TL, stokastik model 1.143.607.000 TL ve robust model ise 1.070.595.960 TL olarak hesaplanmıştır. Bu değerler göz önüne alındığında iki aşamalı stokastik programlama modeli 2021 yılı için robust modele göre 73.011.040 TL daha fazla sapma göstermiştir.

2022 yılı için deterministik model değeri 1.126.681.795 TL, stokastik model 1.207.243.882 TL ve robust model ise 1.196.273.640 TL olarak hesaplanmıştır. Bu değerler göz önüne alındığında iki aşamalı stokastik programlama modelinin robust modele göre 10.970.242 TL daha fazla sapma göstermiştir.

2023 yılı için deterministik model değeri 1.224.189.305 TL, stokastik model 1.338.867.030 TL ve robust model ise 1.255.609.972 TL olarak hesaplanmıştır. Bu değerler göz önüne alındığında iki aşamalı stokastik programlama modelinin robust modele göre 83.257.058 TL daha fazla sapma göstermiştir.

2024 yılı için deterministik model değeri 1.321.693.436 TL, stokastik model 1.407.600.028 TL ve robust model ise 1.402.018.200 TL olarak hesaplanmıştır. Bu değerler göz önüne alındığında iki aşamalı stokastik programlama modelinin robust modele göre 5.581.828 TL daha fazla sapma göstermiştir.



Şekil 6.13. Senaryoların karşılaştırılması

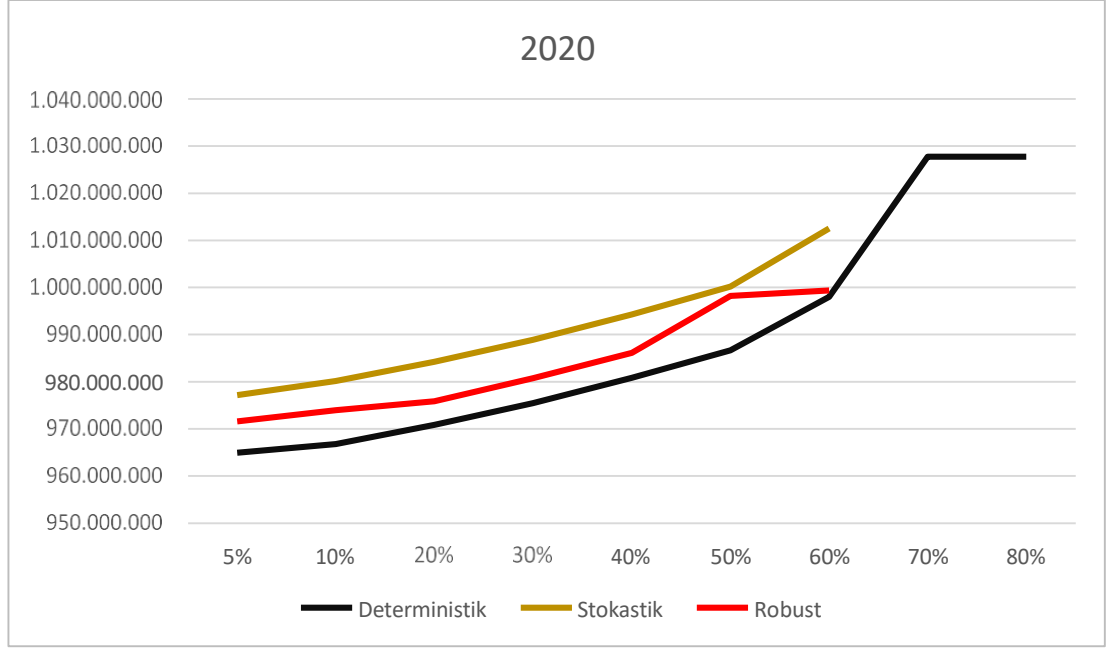
Şekil 6.13. incelendiğinde belirsizlikle başa çıkmada robust programlamanın stokastik programlamaya göre daha iyi sonuçlar verdiği açıkça görülebilir.

6.7 Duyarlılık Analizleri

Çizelge 6.24 2020 yılında tesis kapasitelerinin deterministik model, stokastik model ve robust model için %5'ten %80'e kadar azaltılması durumunda amaç fonksiyonundaki değişimler görülmektedir.

Çizelge 6.24. 2020 yılı için duyarlılık analizi

Azalma Oranı	Deterministik Programlama	Stokastik Programlama	Robust Programlama
%5	964.912.800	977.137.700	971.627.296
%10	966.795.700	980.154.300	973.975.856
%20	970.866.600	984.225.300	975.842.448
%30	975.495.400	988.921.700	980.795.372
%40	980.837.100	994.303.900	986.150.772
%50	986.678.400	1.000.187.000	998.223.445
%60	997.983.700	-	-
%70	1.027.728.000	-	-
%80	-	-	-



Şekil 6.14. 2020 yılı için duyarlılık analizi

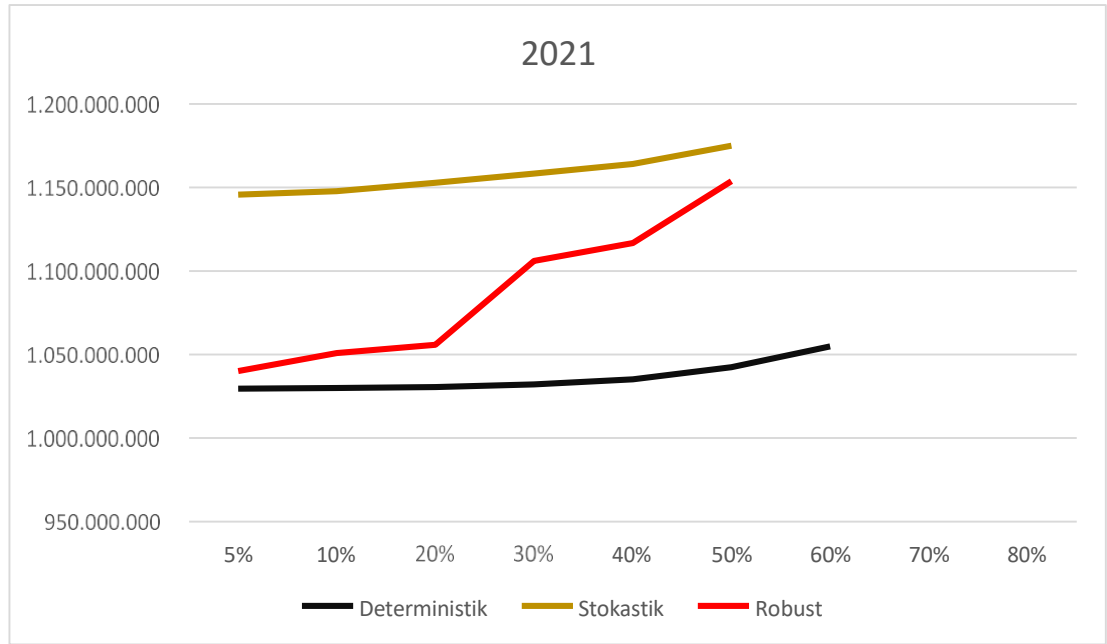
Şekil 6.14’de görüldüğü gibi deterministik, stokastik ve robust model için kapasite azaltımından sonra toplam maliyetlerde artış görülmektedir. Tesis kapasitelerindeki azaltma %60 seviyesinin üzerine çıktığında amaç fonksiyonu için fizibil çözüm bulunamamaktadır. Geliştirilen stokastik model için optimal çözüm sınırı kapasite seviyesinin %60 azaltılmasına kadar elde edilebilmektedir. Bu seviye için toplam maliyette bir artış görülmektedir. Bunun sebebi olarak da taşıma maliyetlerindeki artış düşünülmektedir. Deterministik modelde ise %70 kapasite düşüşü seviyesine kadar optimal çözüm elde edilebilmektedir. %70 seviyesi üzerinde ise fizibil çözüm bulunamamıştır. Şekil 6.5’te görüldüğü üzere stokastik ve robust modelin kapasite değişimlerine karşı daha hassas olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.25’de 2021 yılında tesis kapasitelerinin deterministik model, stokastik model ve robust model için %5’ten %80’e kadar azaltılması durumunda amaç fonksiyonundaki değişimler görülmektedir.

Çizelge 6.25. 2021 yılı için duyarlılık analizi

Azalma Oranı	Deterministik Programlama	Stokastik Programlama	Robust Programlama
%5	1.029.534.000	1.145.734.000	1.040.054.200
%10	1.029.874.000	1.147.812.000	1.050.897.800
%20	1.030.564.000	1.152.808.000	1.055.767.240
%30	1.032.009.000	1.158.233.000	1.106.105.464
%40	1.035.096.000	1.163.996.000	1.116.668.308
%50	1.042.475.000	1.174.967.000	1.153.807.400
%60	1.054.809.000	-	-
%70	-	-	-
%80	-	-	-

Şekil 6.15’de görüldüğü gibi deterministik, stokastik ve robust model için kapasite azaltımından sonra toplam maliyetlerde artış görülmektedir. Tesis kapasitelerindeki azaltma %70 seviyesinin üzerine çıktığında amaç fonksiyonu için fizibil çözüm bulunamamaktadır. Geliştirilen stokastik model için optimal çözüm sınırı kapasite seviyesinin %60 azaltılmasına kadar elde edilebilmektedir. Bu seviye için toplam maliyette bir artış görülmektedir. Bunun sebebi olarak da taşıma maliyetlerindeki artış düşünülmektedir. Deterministik modelde ise %60 kapasite düşüşü seviyesine kadar optimal çözüm elde edilebilmektedir. %60 seviyesi üzerinde ise fizibil çözüm bulunamamıştır. Şekil 6.15’de görüldüğü üzere stokastik ve robust modelin kapasite değişimlerine karşı daha hassas olduğunu ortaya koymaktadır.



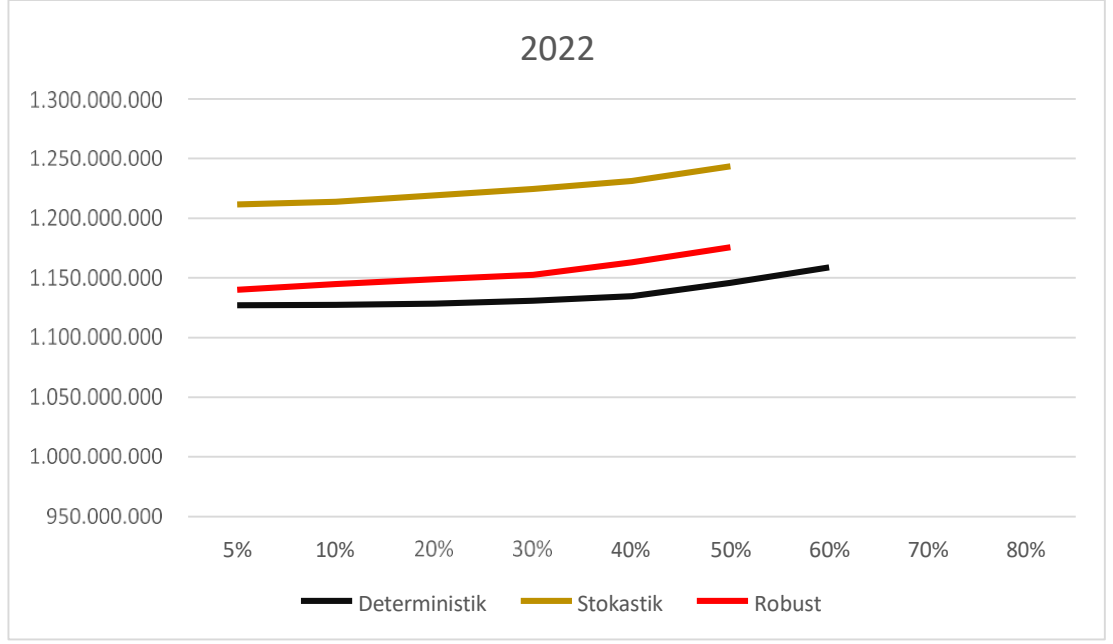
Şekil 6.15. 2021 yılı için duyarlılık analizi

Çizelge 6.26’da 2022 yılında tesis kapasitelerinin deterministik model, stokastik model ve robust model için %5’ten %80’e kadar azaltılması durumunda amaç fonksiyonundaki değişimler görülmektedir.

Çizelge 6.26. 2022 yılı için duyarlılık analizi

Azalma Oranı	Deterministik Programlama	Stokastik Programlama	Robust Programlama
%5	1.127.045.000	1.211.483.000	1.140.089.200
%10	1.127.390.000	1.213.841.000	1.144.828.660
%20	1.128.487.000	1.219.028.000	1.148.802.016
%30	1.130.961.000	1.224.558.000	1.152.506.800
%40	1.134.558.000	1.231.162.000	1.163.001.126
%50	1.145.983.000	1.243.395.000	1.175.728.000
%60	1.158.680.000	-	-
%70	-	-	-
%80	-	-	-

Şekil 6.16’da görüldüğü gibi deterministik, stokastik ve robust model için kapasite azaltımından sonra toplam maliyetlerde artış görülmektedir. Tesis kapasitelerindeki azaltma %70 seviyesinin üzerine çıktığında amaç fonksiyonu için fizibil çözüm bulunamamaktadır.



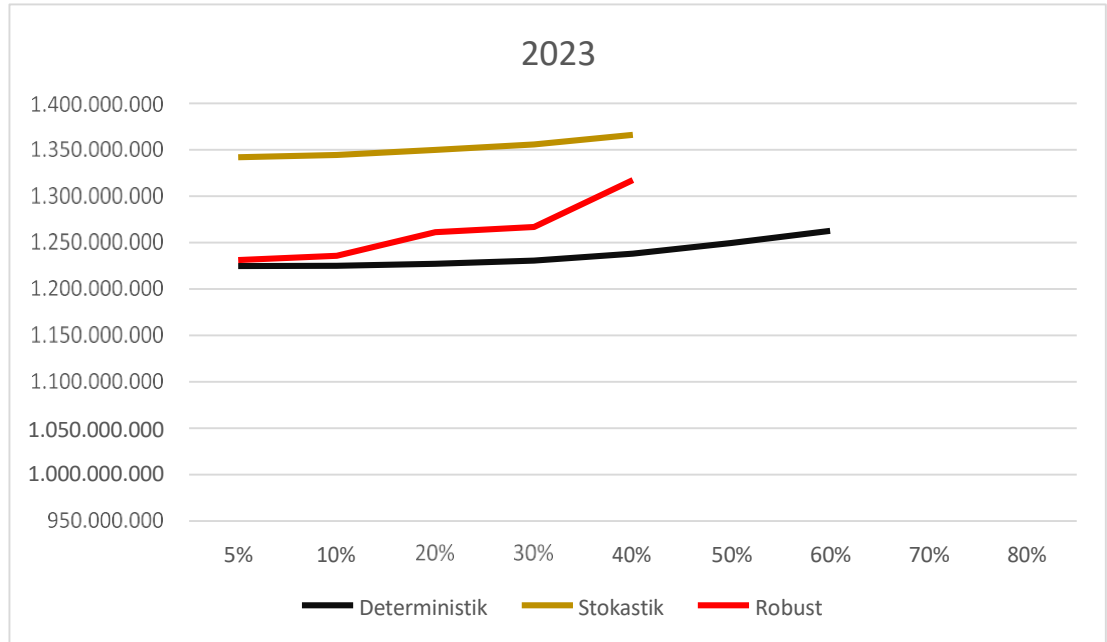
Şekil 6.16. 2022 yılı için duyarlılık analizi

Geliştirilen stokastik model için optimal çözüm sınırı kapasite seviyesinin %50 azaltılmasına kadar elde edilebilmektedir. Bu seviye için toplam maliyette bir artış görülmektedir. Bunun sebebi olarak da taşıma maliyetlerindeki artış düşünülmektedir. Deterministik modelde ise %60 kapasite düşüşü seviyesine kadar optimal çözüm elde edilebilmektedir. %60 seviyesi üzerinde ise fizibil çözüm bulunamamıştır. Şekil 6.16’de görüldüğü üzere stokastik ve robust modelin kapasite değişimlerine karşı daha hassas olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.27’de 2023 yılında tesis kapasitelerinin deterministik model, stokastik model ve robust model için %5’ten %80’e kadar azaltılması durumunda amaç fonksiyonundaki değişimler görülmektedir.

Çizelge 6.27. 2023 yılı için duyarlılık analizi

Azalma Oranı	Deterministik Programlama	Stokastik Programlama	Robust Programlama
%5	1.224.547.000	1.341.739.000	1.231.232.205
%10	1.225.033.000	1.344.339.000	1.235.582.608
%20	1.226.952.000	1.349.831.000	1.261.117.280
%30	1.230.395.000	1.355.711.000	1.266.762.680
%40	1.237.919.000	1.365.907.000	1.317.353.844
%50	1.249.523.000	-	-
%60	1.262.706.000	-	-
%70	-	-	-
%80	-	-	-



Şekil 6.17. 2023 yılı için duyarlılık analizi

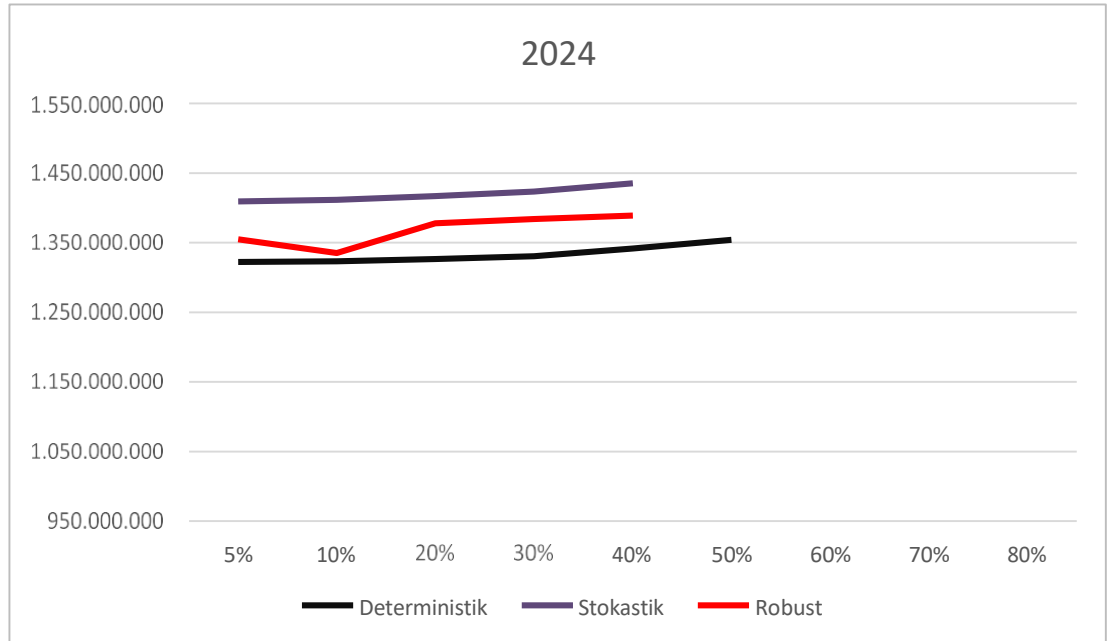
Şekil 6.17’de görüldüğü gibi deterministik, stokastik ve robust model için kapasite azaltımından sonra toplam maliyetlerde artış görülmektedir. Tesis kapasitelerindeki azaltma %60 seviyesinin üzerine çıktığında amaç fonksiyonu için fizibil çözüm bulunamamaktadır. Geliştirilen stokastik model için optimal çözüm sınırı kapasite seviyesinin %60 azaltılmasına kadar elde edilebilmektedir. Bu seviye için toplam maliyette bir artış görülmektedir. Bunun sebebi olarak da taşıma maliyetlerindeki artış düşünülmektedir. Deterministik modelde ise %60 kapasite düşüşü seviyesine kadar optimal çözüm elde edilebilmektedir. %60 seviyesi üzerinde ise fizibil çözüm bulunamamıştır. Şekil

6.27’de görüldüğü üzere stokastik ve robust modelin kapasite değişimlerine karşı daha hassas olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.28’de 2024 yılında tesis kapasitelerinin deterministik model, stokastik model ve robust model için %5’ten %80’e kadar azaltılması durumunda amaç fonksiyonundaki değişimler görülmektedir.

Çizelge 6.28. 2024 yılı için duyarlılık analizi

Azalma Oranı	Deterministik Programlama	Stokastik Programlama	Robust Programlama
%5	1.322.408.000	1.408.913.000	1.354.751.712
%10	1.323.334.000	1.411.456.000	1.335.125.000
%20	1.326.246.000	1.417.076.000	1.377.858.776
%30	1.330.538.000	1.423.363.000	1.383.911.170
%40	1.341.386.000	1.435.315.000	1.389.000.330
%50	1.353.883.000	-	-
%60	-	-	-
%70	-	-	-
%80	-	-	-



Şekil 6.18. 2024 yılı için duyarlılık analizi

Şekil 6.18’de görüldüğü gibi deterministik, stokastik ve robust model için kapasite azaltımından sonra toplam maliyetlerde artış görülmektedir. Tesis kapasitelerindeki azaltma %50 seviyesinin üzerine çıktığında amaç fonksiyonu için fizibil çözüm bulunamamaktadır. Geliştirilen stokastik model için optimal çözüm sınırı kapasite seviyesinin %50 azaltılmasına kadar elde edilebilmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada miktar belirsizliği altında tersine lojistik ağ tasarımı problemi ele alınarak iki aşamalı stokastik programlama modeli ve robust programlama modeli geliştirilmiştir. Önerilen model tek ürünlü, kapasite ve tesis sayısı kısıtlı iki aşamalı stokastik programlama modelidir. İkinci olarak kurulan model ise robust programlama modelidir. Çalışmanın amacı tersine lojistik ağ tasarımı ile ilgili belirsizliklerde modele dahil edilerek karar verme sürecini kolaylaştıran bir model önerilmesidir.

Bu çalışmada, tersine lojistik ağ tasarımı hem deterministik hem de belirsizliği modele dahil eden yöntemlerle çözülmesi çalışmıştır. Çalışmada önerilen model, literatürde yer alan modellere dayanmakla beraber daha önce çözülmemiş olan farklı çözüm yöntemleri ile çözülmesi amaçlanmıştır.

Ömrünü tamamlamış araçlar için uygulanan model GAMS 23.5.1 programı ile çözülmüştür. Miktar belirsizliğini modele dahil etmek için yirmibeş farklı senaryo oluşturulmuştur. Önerilen iki aşamalı stokastik programlama modeli ilk aşamada bertaraf tesislerinin açılma kararlarını alır. Bunlar birinci aşama kararları olarak bilinir. Ömrünü tamamlamış araçların gerçek değerleri gözlemlenerek oluşturulan ve uniform dağılıma uygun olarak kabul edilen değerler belirlendikten sonra ikinci aşamada, model ağıdaki taşıma, toplama, sökme, işleme, geri dönüştürme ve bertaraf kararları alınır. Bunlar ikinci aşama kararları olarak bilinir.

İlk aşamada 2012-2019 yılları arasındaki trafikten kaydı silinen araçların verileri baz alınarak 2020-2024 yılları arası ÖTA tahmini yapılmıştır. Tahmin sürecinde ARIMA kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en küçük Schwarz Criterion değeri ARIMA(2,2,1) olarak bulunmuştur.

İkinci aşamada ise 2020-2024 yılları beş yıllık tahmin edilen veriler deterministik olarak çözülmüştür. Deterministik modelin sonuçlarına göre 2020 yılının maliyeti 981.528.871 TL, 2021 yılının maliyeti 1.029.185.881 TL, 2022 yılının maliyeti 1.126.681.795 TL, 2023 yılının maliyeti 1.224.189.305 ve 2024

yılının maliyeti 1.321.693.436 TL olarak hesaplanmış olup %100 İstanbul ve Ankara'daki bertaraf tesisinin açılması planlanmıştır.

Üçüncü aşama olan stokastik programlama modelinde ömrünü tamamlamış araçların miktarı belirsiz olarak varsayılmış ve belirsizlik yirmibeş adet senaryoyla ifade edilmiştir. Senaryoların oluşturulmasında her il için alt ve üst sınır belirlenerek üniform dağılıma uyduğu varsayılarak hesaplamalar yapılmış olup 2020 yılının maliyeti 989.345.800 TL, 2021 yılının maliyeti 1.143.607.000 TL, 2022 yılının maliyeti 1.207.243.882 TL, 2023 yılının maliyeti 1.338.867.030 TL ve 2024 yılının maliyeti 1.402.600.028 TL olarak hesaplanmış olup İstanbul, Ankara ve Kayseri'deki bertaraf tesisinin açılması planlanmıştır.

Son olarak modelin robust programlama ile tasarımı yapılmıştır. Bu çözümler neticesinde 2020 yılının maliyeti 967.449.280 TL, 2021 yılının maliyeti 1.070.595.960 TL, 2022 yılının maliyeti 1.196.273.640 TL, 2023 yılının maliyeti 1.255.609.972 TL ve 2024 yılının maliyeti 1.402.018.200 TL olarak hesaplanmıştır. İki aşamalı stokastik programlama yöntemini kullanıldığında, ortalama %59 verimlilik kaybı olduğu görülmüştür. Robust optimizasyon için maksimum sapma, iki aşamalı stokastik programlama yaklaşımı kaybının %17'sinden daha az olduğu gözlemlenmiştir.

Son aşama da ise önerilen iki aşamalı stokastik programlama yöntemi ve robust programlama yönteminin sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en kötü durum senaryosunda bile robust optimizasyon iki aşamalı stokastik programlama yönteminden daha iyi performans göstermiştir.

Gelecekteki çalışmalar için model, modele üreticilerde dahil edilerek kapalı döngü olarak tasarlanabilir. Ayrıca miktar belirsizliğine ek olarak modele maliyet parametreleri belirsizliği, tesis kapasitelerindeki belirsizlik vb. modele dahil edilebilir.

KAYNAKLAR

- Ayvaz, B., 2013. Miktar ve Kalite Belirsizliği Altında Tersine Lojistik Ağ Tasarımı İçin Bir Stokastik Programlama Modeli Önerisi: Elektronik Atık Sektöründe Bir Uygulama, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İşletme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, İstanbul.
- Ben-Tal, A., El Ghaoui, L., Nemirovski, A., 2009. Robust Optimization, USA: Princeton University Press.
- Bertsimas, D., Brown, D.B., 2009. Constructing Uncertainty Sets for Robust Linear Optimization, Operations Research, 57, 6, 1483-1495.
- Bertsimas, D., Sim, M., 2003. Robust Discrete Optimization and Network Flows, Mathematical programming, 98, 1-3, 49-71.
- Bienstock, D., Shapiro, J., 1998. Optimizing Resource Acquisition Decisions by Stochastic Programming, Management Science, 34, 2, 215-229.
- Birge, J.R., Louveaux, F., 1997. Introduction to Stochastic Programming, Springer-Verlag, Berlin.
- Chouinard, M., Amoursa, S., Ait-Kadia D., 2008. A Stochastic Programming Approach For Designing Supply Loops, International Journal of Production Economics, 113, 657-677.
- Choi J., Stuart J. A., Ramani K., 2005. Modeling of Automotive Recycling Planning in the United States, International Journal of Automotive Technology, 6, 4, 413-419.
- Chan T. S., Chan H. K. and Zhang J. ,2006. Reverse Logistics Model For Mobile Phone Industry, IEEE International Conference on Service Operations and Logistics and Informatics, 294-299.
- Cruz-Rivera, R., Ertel, J., 2009. Reverse Logistics Network Design for the Collection of End-of-Life Vehicles in Mexico, European Journal of Operational Research, 196, 3, 930-939.
- Daugherty P.J., Richey R. G., Genchev S.E., Autry C. W., 2004. Reverse Logistics: The Impact of Timing and Resources, Journal of Business Logistics, 25, 2.
- Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K., Wassenhove, L.N.V., 2004. Reverse Logistics: Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains, Verlag, Heidelberg.
- Demirel, N., Gökçen, H., 2008. Geri Kazanımlı İmalat Sistemleri İçin Lojistik Ağı Tasarımı: Literatür Araştırması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 23, 4, 903-912.

- Demirel, E., Gökçen, H., 2016. A Mixed Integer Linear Programming Model to Optimize Reverse Logistics Activities of End-of-Life Vehicles in Turkey, *Journal of Cleaner Production*, 112, 2101-2113.
- Dowlatshahi S. ,2005. A Strategic Framework for the Design and Implementation of Remanufacturing Operations in Reverse Logistics, *International Journal of Production Research*, 43, 16, 3455 – 3480.
- Dowlatshahi S., 2000. Developing a Theory of Reverse Logistics, *Interfaces* 30, 3, 143-155.
- Ene S., Öztürk, N., 2014. Ömrünü Tamamlamış Araçlar için Toplama Ağının Tasarımı, *Uludağ Üniversitesi, 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa.
- Fabian, C.I., Szoke, Z., 2007. Solving Two-Stage Stochastic Programming Problems With Level Decomposition, *Computational Management Science*, 4, 313-353.
- Fleischmann M., Bloemhof-Ruwaard J.M., 1997. Quantitative Models for Reverse Logistics: A review, *European Journal of Operational Research*, 103, 1-17.
- Fleischmann, M., Krikke, H.R., Dekker, R., Flapper, S.D.P., 2000. A Characterisation of Logistics Networks for Product Recovery, *Omega : The International Journal of Management Science*, 28, 653-666.
- Fleischmann M., Beullens P., Bloemhof-Ruwaard J.M., 2001. The Impact of Product Recovery on Logistics Network Design, *Luk N Van Wassenhove, Production and Operations Management*, 10, 2, 156-173.
- Fleischmann, M., 2001. *Quantitative Models For Reverse Logistics*, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Fonseca M.C., Sánchez A.G., Mier M.O., Da Gama F.S., 2010. A Stochastic Bi-Objective Location Model For Strategic Reverse Logistics, *Business and Economics*, 18, 1, 158-184.
- Francas, D., Minner, S., 2009. Manufacturing Network Configuration İn Supply Chains With Product Recovery, *Omega*, 37, 757 – 769.
- Gomes, M. I., Pova, A. P. B., Novais, A. Q., 2011. Modelling A Recovery Network For WEEE: A Case Study İn Portugal, *Waste Management*, 31, 1645–1660.
- Goetschalckx M., Vidal C.J., Dogan K., 2002. Modeling and Design of Global Logistics Systems: A Review of Integrated Strategic and Tactical Models and Design Algorithms, *European Journal of Operational Research*, 143, 1–18.
- Guide, J., Jayaraman, V., Srivasta, R., 2000. Supply- Chain Managament for Recoverable Manufacturing Systems, *Interfaces*, 128.

- Golebiewski B., Trajer J., Jaros M., Winiczenko R., 2013. Modelling Of The Location Of Vehicle Recycling Facilities: A Case Study In Poland, *Resources Conservation and Recycling*, 80, 1, 10–20.
- Harraz, N. A., Galal N. M., 2011. Design of Sustainable End-of-life Vehicle Recovery Network in Egypt, *Ain Shams Engineering Journal*, 2, 3, 211-219.
- Hasani, A., Zegordi, S.H., Nikbakhsh, E., 2011. Robust Closed-Loop Supply Chain Network Design For Perishable Goods In Agile Manufacturing Under Uncertainty, *International Journal of Production Research*.
- Hatefi, S.M., Jolai, F., 2014. Robust and Reliable Forward–Reverse Logistics Network Design Under Demand Uncertainty And Facility Disruptions, *Applied Mathematical Modelling*, 38, 9–10, 2630-2647.
- Kara, S., Onut, S., 2010. A Two-Stage Stochastic And Robust Programming Approach To Strategic Planning Of A Reverse Supply Network: The Case Of Paper Recycling, *Expert Systems With Applications*, 37, 6129–6137.
- Karaçay, G., 2005. Tersine Lojistik: Kavram ve İşleyiş, *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 14, 317-331.
- Keyvanshokoh, E., Ryan, S.M., Kabir, E., 2016. Hybrid Robust And Stochastic Optimization For Closed-Loop Supply Chain Network Design Using Accelerated Benders Decomposition, *European Journal Of Operational Research*, 249, 1, 76-92.
- Kim, J., Chung B.D., Kang Y. , Jeong B., 2018. Robust Optimization Model For Closed-Loop Supply Chain Planning Under Reverse Logistics Flow And Demand Uncertainty, *Journal Of Cleaner Production*, 196, 1314-1328.
- Lee, D., Dong, M., Bian, W., 2010. The Design Of Sustainable Logistics Network Under Uncertainty, *International Journal Production Economics*, 128, 159–166.
- Leung, S.C.H, Lai, W.-L., Ng, W.L., Wu, Y., 2007. Robust Optimization Model for Production Planning of Perishable Products, *Journal of the Operational Research Society*, 58, 4, 413-422.
- Li, Z., Ding, R., Floudas, C.A., 2011. A Comparative Theoretical and Computational Study on Robust Counterpart Optimization: I. Robust Linear Optimization and Robust Mixed Integer Linear Optimization, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 10567-10603.
- Listeş, O., 2002. A Decomposition Approach To A Stochastic Model For Supply And Return Network Design, *Erasmus*, 1-27.

- Listeş, O., 2007. A Generic Stochastic Model For Supply-And-Return Network Design, *Computers & Operations Research*, 34, 417-442.
- Mahmoudzadeh M., Mansour S., Shokoohyar S., Karimi B., 2011. Designing and Modelling a Third Party Reverse Logistics Network for End of Life Vehicles.
- Maqsood, I., Huang, G.H., 2003. A Two-Stage Interval Stochastic Programming Model For Waste Management Under Uncertainty, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53, 540- 552.
- Mansour, S., Zarei, M., A., 2008. Multi-Period Reverse Logistics Optimisation Model For End Of-Life Vehicles Recovery Based on EU Directive. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21, 764–77.
- Mansour S., Zarei M., Husseinazadeh Kashan A., Karimi B., 2010. Designing A Reverse Logistics Network For End-Of-Life Vehicles Recovery, *Mathematical Problems in Engineering*.
- Merkisz-Guranowska A., 2011a. End-of-Life Vehicles Recycling Network Design, *Journal of Kones Powertrain and Transport*, 18, 3.
- Merkisz-Guranowska A., 2011b. The optimization of vehicles recycling facility location, *WIT Transactions on the Built Environment*.
- Min, H., Ko, H. J., Ko, C. S., 2006. A genetic algorithm approach to developing the multiechelon reverse logistics network for product returns, *Omega*, 34, 56-69.
- Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J. Ve Zenios, S. A. ,1995. Robust Optimization of Large Scale Systems, *Operations Research*, 43, 2, 264-281.
- Phuc K., Nguyen P., Yu V. F., Tsao Y.C., 2016. Optimizing Fuzzy Reverse Supply Chain For End-Of-Life Vehicles, *Computers & Industrial Engineering*, 1-20.
- Pishvae, M.S., Jola, F., Razmi, J., 2009. A Stochastic Optimization Model For Integrated Forward/Reverse Logistics Network Design, *Journal Of Manufacturing Systems*, 28, 4, 107-114.
- Pishvae, M.S., Rabbani, M., Torabi, S.A. ,2011.. A Robust Optimization Approach To Closed-Loop Supply Chain Network Design Under Uncertainty, *Applied Mathematical Modelling*, 35, 637–649.
- Rakesh V., Vinayak V., 2005. Reverse Logistics; An Important Dimension of Supply Chain Management, *National Institute of Industrial Engineering*, Mumbai, 1.

- Ramezani, M., Bashiri, M., Moghaddam, R.T., 2012. A New Multi-Objective Stochastic Model for a Forward/Reverse Logistic Network Design with Responsiveness and Quality Level, *Applied Mathematical Modelling*, 37, 328-344.
- Rogers Dale S., Tibben-Lembke R.S., 1998. *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, University of Nevada, Reno Center for Logistics Management.
- Salema, M.I.G., Barbosa-Povoa, A.P., Novais, A.Q., 2007. An Optimization Model For The Design Of A Capacitated Multi-Product Reverse Logistics Network With Uncertainty, *European Journal Of Operational Research*, 179, 1063-1077.
- Schultmann, F., Zumkeller, M., Rentz, O., 2004. Integrating Spent Products Material Into Supply Chains: The Recycling Of End-Of-Life Vehicles As An Example, *Supply Chain Management And Reverse Logistics*, 35-59.
- Schultmann, F., Zumkeller, M., Rentz, O., 2006. Modeling Reverse Logistic Tasks Within Closed Loop Supply Chains: An Example From The Automotive Industry, *European Journal Of Operational Research*, 171, 1033-50.
- Simic, V., Dimitrijevic, B., 2012. Modelling Production Processes In A Vehicle Recycling Plant, *Waste Management & Research : The Journal Of The International Solid Wastes And Public Cleansing Association*.
- Simic V., 2015. Fuzzy Risk Explicit Interval Linear Programming Model For End-Of-Life Vehicle Recycling Planning In The EU, EU.
- Srinivasan S., Khan S. H., 2016. Environmentally Conscious Optimization of Closed Loop Supply Chain Network with Vehicle Routing, *Advances in Theoretical and Applied Mathematics*, 11, 3, 223-243.
- Srivastava, S. K. Srivastava, R. K., 2006. Managing Product Returns For Reverse Logistics, *International Journal Of Physical Distribution & Logistics Management*, 36, 7, 524-546.
- Tosun, E., 2005. *Tersine Lojistik Kavramı Ve 3PL Şirketlerinde Tersine Lojistik Karar Verme Modeli, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Xiaolong J., Rui F., Wang L., 2009. The Location Selection of Automobile Reverse Logistics Network within Closed-loop Supply Chains. *Scholl of Automobile Chang'an University*.
- Wallace, S., Ziemba, W. T., 2003. *Applications of Stochastic Programming*, MPS SIAM – Series in Optimization, first edition.

EKLER

Ek A Deterministik modele ilave edilen 2021 yılı ömrünü tamamlamış araç sayıları

İL	ÖTA	İL	ÖTA	İL	ÖTA
İstanbul	161111	Malatya	8307	Bitlis	3614
Ankara	58541	Erzurum	7911	Rize	3563
İzmir	45338	Ordu	7830	Amasya	3507
Bursa	31727	Afyonkarahisar	7573	Siirt	3429
Antalya	26075	Sivas	6633	Bolu	3282
Adana	23233	Adıyaman	6504	Nevşehir	3146
Konya	23175	Tokat	6361	Kars	2963
Şanlıurfa	21527	Batman	6319	Kırıkkale	2938
Gaziantep	21483	Zonguldak	6188	Hakkâri	2917
Kocaeli	20275	Elazığ	6136	Bingöl	2905
Mersin	19106	Kütahya	6013	Yalova	2813
Diyarbakır	18233	Çanakkale	5628	Burdur	2811
Hatay	16910	Osmaniye	5593	Karaman	2629
Manisa	14955	Ağrı	5566	Karabük	2579
Kayseri	14611	Çorum	5511	Kırşehir	2522
Samsun	14000	Şırnak	5498	Erzincan	2437
Balıkesir	12755	Giresun	4655	Bilecik	2278
Kahramanmaraş	11981	Isparta	4619	Sinop	2266
Van	11801	Yozgat	4373	Iğdır	2070
Aydın	11533	Aksaray	4322	Bartın	2058
Denizli	10768	Edirne	4297	Çankırı	2033
Sakarya	10689	Muş	4244	Artvin	1774
Tekirdağ	10957	Düzce	4071	Gümüşhane	1708
Muğla	10206	Kastamonu	3939	Kilis	1479
Eskişehir	9213	Uşak	3846	Ardahan	1010
Mardin	8708	Niğde	3767	Bayburt	881
Trabzon	8398	Kırklareli	3756	Tunceli	879

Ek B Deterministik modele ilave edilen 2022 yılı ömrünü tamamlamış araç sayıları

İL	ÖTA	İL	ÖTA	İL	ÖTA
İstanbul	176282	Malatya	9089	Bitlis	3954
Ankara	64054	Erzurum	8656	Rize	3899
İzmir	49607	Ordu	8567	Amasya	3837
Bursa	34714	Afyonkarahisar	8286	Siirt	3752
Antalya	28530	Sivas	7258	Bolu	3591
Adana	25421	Adıyaman	7116	Nevşehir	3442
Konya	25357	Tokat	6960	Kars	3242
Şanlıurfa	23554	Batman	6914	Kırıkkale	3215
Gaziantep	23506	Zonguldak	6771	Hakkâri	3192
Kocaeli	22184	Elazığ	6714	Bingöl	3178
Mersin	20905	Kütahya	6580	Yalova	3078
Diyarbakır	19950	Çanakkale	6158	Burdur	3076
Hatay	18502	Osmaniye	6120	Karaman	2877
Manisa	16364	Ağrı	6091	Karabük	2822
Kayseri	15987	Çorum	6030	Kırşehir	2760
Samsun	15318	Şırnak	6016	Erzincan	2666
Balıkesir	13956	Giresun	5093	Bilecik	2492
Kahramanmaraş	13109	Isparta	5054	Sinop	2479
Van	12912	Yozgat	4784	Iğdır	2265
Aydın	12619	Aksaray	4729	Bartın	2252
Denizli	11782	Edirne	4701	Çankırı	2224
Sakarya	11696	Muş	4644	Artvin	1941
Tekirdağ	11988	Düzce	4455	Gümüşhane	1869
Muğla	11167	Kastamonu	4310	Kilis	1619
Eskişehir	10081	Uşak	4209	Ardahan	1105
Mardin	9528	Niğde	4122	Bayburt	964
Trabzon	9189	Kırklareli	4110	Tunceli	962

Ek C Deterministik modele ilave edilen 2023 yılı ömrünü tamamlamış araç sayıları

İL	ÖTA	İL	ÖTA	İL	ÖTA
İstanbul	191454	Malatya	9871	Bitlis	4295
Ankara	69567	Erzurum	9401	Rize	4234
İzmir	53877	Ordu	9304	Amasya	4167
Bursa	37702	Afyonkarahisar	8999	Siirt	4075
Antalya	30986	Sivas	7882	Bolu	3900
Adana	27608	Adıyaman	7728	Nevşehir	3738
Konya	27540	Tokat	7559	Kars	3521
Şanlıurfa	25581	Batman	7509	Kırkkale	3491
Gaziantep	25529	Zonguldak	7353	Hakkâri	3466
Kocaeli	24094	Elazığ	7292	Bingöl	3452
Mersin	22704	Kütahya	7146	Yalova	3343
Diyarbakır	21667	Çanakkale	6688	Burdur	3341
Hatay	20095	Osmaniye	6646	Karaman	3125
Manisa	17772	Ağrı	6615	Karabük	3065
Kayseri	17363	Çorum	6549	Kırşehir	2997
Samsun	16636	Şırnak	6534	Erzincan	2896
Balıkesir	15157	Giresun	5532	Bilecik	2707
Kahramanmaraş	14238	Isparta	5489	Sinop	2692
Van	14024	Yozgat	5196	Iğdır	2460
Aydın	13706	Aksaray	5137	Bartın	2446
Denizli	12796	Edirne	5106	Çankırı	2415
Sakarya	12702	Muş	5043	Artvin	2108
Tekirdağ	13020	Düzce	4838	Gümüşhane	2030
Muğla	12129	Kastamonu	4681	Kilis	1758
Eskişehir	10948	Uşak	4571	Ardahan	1201
Mardin	10348	Niğde	4476	Bayburt	1047
Trabzon	9980	Kırklareli	4464	Tunceli	1044

Ek D Deterministik modele ilave edilen 2024 yılı ömrünü tamamlamış araç sayıları

İL	ÖTA	İL	ÖTA	İL	ÖTA
İstanbul	206625	Malatya	10653	Bitlis	4635
Ankara	75079	Erzurum	10146	Rize	4570
İzmir	58146	Ordu	10041	Amasya	4498
Bursa	40690	Afyonkarahisar	9712	Siirt	4397
Antalya	33441	Sivas	8507	Bolu	4209
Adana	29796	Adıyaman	8341	Nevşehir	4034
Konya	29722	Tokat	8158	Kars	3800
Şanlıurfa	27608	Batman	8104	Kırkkale	3768
Gaziantep	27552	Zonguldak	7936	Hakkâri	3741
Kocaeli	26003	Elazığ	7870	Bingöl	3725
Mersin	24504	Kütahya	7712	Yalova	3608
Diyarbakır	23384	Çanakkale	7218	Burdur	3605
Hatay	21687	Osmaniye	7173	Karaman	3372
Manisa	19180	Ağrı	7139	Karabük	3308
Kayseri	18738	Çorum	7068	Kırşehir	3235
Samsun	17955	Şırnak	7051	Erzincan	3125
Balıkesir	16358	Giresun	5970	Bilecik	2921
Kahramanmaraş	15366	Isparta	5924	Sinop	2906
Van	15135	Yozgat	5608	Iğdır	2655
Aydın	14792	Aksaray	5544	Bartın	2640
Denizli	13810	Edirne	5511	Çankırı	2607
Sakarya	13709	Muş	5443	Artvin	2275
Tekirdağ	14052	Düzce	5221	Gümüşhane	2190
Muğla	13090	Kastamonu	5051	Kilis	1897
Eskişehir	11816	Uşak	4933	Ardahan	1296
Mardin	11168	Niğde	4831	Bayburt	1130
Trabzon	10771	Kırklareli	4818	Tunceli	1127

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Duygu ERDOĞAN

Doğum Yeri ve Yılı : Eminönü, 30/11/1989

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : duygu.erdogan@istanbulticaret.edu.tr



Eğitim Durumu

Lise :Başarılı Koleji

Lisans :Haliç Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik

Lisans :Haliç Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Endüstri Mühendisliği

Yüksek Lisans :İstanbul Ticaret Üniversitesi,
Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yayınları

Erdoğan D. ve Ayvaz B., 2020. Ömrünü tamamlamış araçların geri kazanımı için belirsizlik altında ağ tasarımı. Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3(1), 35-71.