

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKTAR VE KALİTE BELİRSİZLİĞİ ALTINDA TERSİNE LOJİSTİK AĞ
TASARIMI İÇİN BİR STOKASTİK PROGRAMLAMA MODELİ ÖNERİSİ:
ELEKTRONİK ATIK SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA**

DOKTORA TEZİ

Berk AYVAZ

İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı

İşletme Mühendisliği Programı

EYLÜL 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKTAR VE KALİTE BELİRSİZLİĞİ ALTINDA TERSİNE LOJİSTİK AĞ
TASARIMI İÇİN BİR STOKASTİK PROGRAMLAMA MODELİ ÖNERİSİ:
ELEKTRONİK ATIK SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA**

DOKTORA TEZİ

**Berk AYVAZ
(507072002)**

İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı

İşletme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hür Bersam BOLAT

EYLÜL 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 507072002 numaralı Doktora Öğrencisi **Berk AYVAZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**MİKTAR VE KALİTE BELİRSİZLİĞİ ALTINDA TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIMI İÇİN BİR STOKASTİK PROGRAMLAMA MODELİ ÖNERİSİ: ELEKTRONİK ATIK SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA**" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Hür Bersam BOLAT**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet TANYAŞ**
Maltepe Üniversitesi

Prof. Dr. Sibkat KAÇTIOĞLU
İstanbul Ticaret Üniversitesi

Prof. Dr. Cengiz KAHRAMAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ferhan ÇEBİ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **9 Temmuz 2013**
Savunma Tarihi : **17 Eylül 2013**

Pek Saygıdeğer Büyüklerime, Aileme, Kardeşlerime ve Eşime,

ÖNSÖZ

Kadim gelenekte söylenegeldiği gibi “her şey aslına dönücüdür”. Her ne ki var şu âlemde bir gün mutlak ilk haline geri dönecektir. Bu vecihten bakıldığında her şey bir çevrim ya da bir döngü kanununa tabidir. Buradan hareketle herbir varlığın ya da eşyanın hayat sürecinin doğrusal değil dairesel olduğu söylenebilir. Yani var olanlar için hayat denen kavram başladığı noktada biten bir döngüdür. Aslında etrafımıza biraz dikkatli bakacak olursak bu dairesel hareketleri mikro âlemde makro âleme kadar hemen her alanda fark edebiliriz. Azot çevrimi, kan dolaşımı, dünyanın güneş etrafındaki dönüşü vs. ilk göze çarpan döngülerdir. Bu tabiata ait olan dairesel döngüler aslında insanoğlunun ürettiği ürünler için de geçerli olmalıdır ki tabiattaki denge bozulmadan devam edebilsin. Ürünler hammaddelelerden yapılmakta ve belirli süreçlerden geçerek son ürün haline gelmektedir. Son zamanlara kadar kaynağı hammadde olup kullanıcılar tarafından kullanılan ürünler maalesef ilk haline yani tekrar hammaddeye dönüştürülememekte ve döngü tamamlanamamaktaydı. Fakat son yıllarda insanoğlu dairesel yapıyı bozmanın tabiattaki dengeyi bozmak anlamına geldiğinin farkına vardı ve atıkların geri dönüşümünü keşfetti. Bu tez kapsamında elektrikli ve elektronik atık eşyaların geri dönüşümünü kapsayan tersine lojistik ağ tasarımı odaklanılmıştır.

Bu çalışmanın hazırlanmasında her türlü desteği benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden çok istifade ettiğim ve önümüzdeki yıllarda da etmeyi istediğim tez danışmanım Sayın Doç. Dr. H. Bersam Bolat’a teşekkür etmeyi bir borç olarak bilmekteyim. Aynı şekilde tez izleme jürimde olan ve tezimin her aşamasında değerli görüşleri ile bana hep destek olan hocalarım Prof. Dr. Demet Bayraktar, Prof. Dr. Mehmet Tanyaş ve Doç. Dr. Ferhan Çebi’ye teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlanması aşamasında kendilerinden altın değerinde tavsiyeler aldığım Prof. Dr. Fikri Karaesmen, Prof. Dr. Necati Aras, Yrd. Doç. Dr. Fatma Tevhide Altekin, Yrd. Doç. Dr. Ayşe Tombuş, Yrd. Doç. Dr. Ebru Angün’e müteşekkirim olduğumu belirtmek isterim. Tez sürecinde ve hayatımın diğer aşamalarında çok desteğini gördüğüm Sayın Dr. Sinan Genim Beyefendi’ye ve ailesine özellikle teşekkür etmek isterim.

Özellikle tezimde geliştirilen modelin uygulamasını yapmamda gerçek veri bulmanın çok zor olduğu ülkemizde bana her türlü yakınlık ve yardımı sağlayan çok saygıdeğer Exitcom Geri Dönüşüm firması genel müdürü Murat Ilgar’a ve aynı firmadan Sayın Esra Eken’e hususi olarak teşekkürlerimi arz etmek isterim.

Yine tezin hazırlanması aşamasında takıldığım bazı yerleri aşmamda çok değerli fikirleriyle bana yardımcı olan Pınar Dursun, M. Çağatay İris, Dilek Özdemir, Muhammet Balcılar, Dr. Nezir Aydın ve şu zorlu tez aşamasında benimle aynı sıkıntıları paylaşan, görüş ve fikirleri ile hep bana yardımcı olan değerli insan Gül Temur’a çok teşekkür ediyorum.

Tabiki tez aşamasında bana her türlü imkanı sağlayan saygıdeğer büyüklerime, aileme ve sevgili kardeşlerime teşekkürü bir borç olarak bilmekteyim.

Temmuz 2013

Berk Ayvaz
(Makine Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ.....	1
2. TERSİNE LOJİSTİK	5
2.1 Tersine Lojistik Tanımı ve Kapsamı	5
2.2 Tersine Lojistikte Rol Oynayan Aktörler	6
2.3 Tersine Lojistik Faaliyetleri	8
2.3.1 Toplama	8
2.3.2 Muayene ve ayıklama	9
2.3.3 Yeniden işleme ya da doğrudan geri kazanım	9
2.3.4 Elden çıkarma	11
2.3.5 Yeniden dağıtım	11
2.4 Tersine Lojistikte Geri Dönüş Kaynakları	12
2.5 Ters Lojistikte Karar Aşamaları	14
2.6 İşletmelerin Tersine Lojistik Uygulama Sebepleri.....	15
2.6.1 Ekonomik faktörler	15
2.6.2 Yasal düzenlemeler	16
2.6.3 Çevresel duyarlılık	17
2.7 İleri Lojistik ve Tersine Lojistik Arasındaki Farklar	17
2.8 Tersine Lojistik Ağlarının Sınıflandırılması	19
2.9 Elektrikli-Elektronik Atıkların Geri Dönüşümü	19
2.9.1 AEEE ürünlerinin karakteristikleri	22
2.9.2 E-atıkların (AEEE) yönetmelik bakımından incelenmesi.....	24
2.9.2.1 RoHS	24
2.9.2.2 AEEE	25
2.9.3 E-atık yönetiminde Türkiye ‘deki durum.....	26
2.10 Tersine Lojistikte Problem Araştırma Alanları	30
2.11 Tersine Lojistik Ağı Tasarımı	31
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	33
3.1 Deterministik Modeller	33
3.2 Stokastik Programlama Modelleri.....	40
3.3 Robust Optimizasyon	46
3.4 Yazın Taraması Sonuçlarının Değerlendirilmesi	53
3.4.1 Ağ yapısı	53
3.4.2 Modelleme şekli.....	55
3.4.3 Amaç sayısı	56
3.4.4 Amaç çeşitleri	57

3.4.5 Ürün sayısı.....	61
3.4.6 Çözüm metodu	62
3.4.7 Ürün çeşidi	63
3.4.8 Belirsizlikler	64
4. TEZ KAPSAMINDA KULLANILAN PROGRAMLAMA VE ÇÖZÜM	
METODU	71
4.1 Stokastik Programlama.....	71
4.1.1 Temel kavramlar	74
4.1.2 Stokastik programlamada kararlar ve aşamalar	76
4.1.3 İki aşamalı stokastik programlama.....	76
4.1.4 Bilginin değeri ve stokastik çözüm	78
4.1.4.1 Mükemmel bilginin beklenen değeri.....	79
4.1.4.2 Stokastik çözümün değeri	80
4.1.5 Stokastik optimizasyon	82
4.1.5.1 Monolitik KTP	82
4.1.5.2 Örneklem metodu.....	82
4.2 Örneklem Ortalama Yakınsaması.....	83
5. TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIM METODOLOJİSİ	87
5.1 Önerilen GDAT Modelinin Yapısı	89
5.2 Modelin Varsayımları	91
5.3 Önerilen Deterministik GDAT Modelinin Formülasyonu	92
5.4 Önerilen İki Aşamalı Stokastik GDAT Modelinin Formülasyonu.....	96
5.5 Sayısal Örnek.....	100
5.5.1 Monolitik SP çözümü.....	105
5.5.2 SAA çözümü	108
5.6 Deneysel Çalışma	115
5.6.1 Monolitik SP deneysel çalışması.....	115
5.6.2 SAA yöntemi için deneysel çalışma.....	117
6. UYGULAMA.....	129
6.1 AEEE İçin Geliştirilen GDAT Modelinin Yapısı ve Modelde Kullanılacak Veriler	129
6.2 Stokastik Programlama Modelindeki Geri Dönen Ürün Miktarı ve Kalite Belirsizliklerinin Giderilmesi	137
6.2.1 Senaryo üretimi	137
6.3 Monolitik SP Modelinin Sonuçları.....	140
6.3.1 Modelin geçerliliği	144
6.4 SAA Çözümü.....	149
6.4.1 SAA çözümü analizi.....	158
6.5 Monolitik SP Yaklaşımı ve SAA Yönteminin Karşılaştırılması.....	159
6.5 Geçerlilik ve Duyarlılık Analizleri.....	160
6.5.1 Geliştirilen modelin geçerlilik testi	160
6.5.1.1 Geri dönüşün olmadığı durum.....	161
6.5.1.2 Tesis kapasitelerinin sıfır ve çok yüksek olduğu durumlar.....	161
6.5.2 Duyarlılık analizi.....	161
6.5.2.1 Tesis kapasitelerindeki değişimin amaç fonksiyonuna etkisi	161
6.5.2.2 Geri dönen e-atık miktarında değişimin amaç fonksiyonuna etkisi	163
6.6 Çalışmada Kullanılan Metotların Güçlü-Zayıf Yönleri ve Çalışmanın Kısıtları.....	164
6.6.1 Çalışmanın kısıtları	166
7. SONUÇLAR.....	169

7.1 Gelecekteki Çalışmalar İçin Tavsiyeler	173
KAYNAKLAR	175
EKLER.....	189
ÖZGEÇMİŞ.....	191

KISALTMALAR

AD	: Açık Döngü
AEEE	: Atık Elektronik ve Elektrik Eşyalar
AMM	: Belediye Toplama Noktalarına Atamaların Minimizasyonu
AT	: Ayıklama Tesis
AtM	: Atık Minimizasyonu
B&B	: Dal Sınır Algoritması
B2B	: İşten İşe
BD	: Beklenen Değer
BDÇBD	: Beklenen Değer Çözümünün Beklenen Değeri
BG	: Bekle ve Gör
BM	: Bertaraf Merkezleri
BŞ	: Burada ve Şimdi
BTM	: Birim Taşıma Maliyeti
C	: Tesis Kapasitesi
Cc	: Toplama Merkezi Kapasitesi
CEM	: Karbon Gazı Emisyonu Minimizasyonu
CO₂	: Karbondioksit Gazı
CSM	: Müşteri Hizmet Seviyesi Maksimizasyonu
CVar	: Risk Değeri
CYM	: CO ₂ Emisyonu Minimizasyonu
ÇA	: Çok Aşamalı
ÇEM	: Çevresel Etki Minimizasyonu
ÇKM	: Çevresel Kirlilik Minimizasyonu
ÇRM	: Çevresel Risk Minimizasyonu
D	: Talep
Dc	: Bertaraf Maliyeti
DM	: Taşıma Mesafesi Minimizasyonu
DP	: Deterministik Programlama
Dr	: Bertaraf Oranı
EEE	: Elektrikli ve Elektronik Eşyalar
EEV	: The Expected Value of Expected Value
EM	: Enerji Tüketimi Minimizasyonu
EU	: Avrupa Birliği
EV	: Expected Value
EVPI	: Expected Value of Perfect Information
GAKM	: Gayri Resmi Atık Sektörünün Kar Maksimizasyonu
GDAT	: Geri Dönüşüm Ağ Tasarımı
GDM	: Geri Dönüşüm Merkezleri
GM	: Geri Dönüş Oranı Maksimizasyonu
GMİ	: Geri Dönmesi İstenen Atık Hedefi
GY	: Gecikme Yüzdesi
HP	: Hammadde Pazarları
GP	: Hedef Programlama

İA	: İki Aşamalı
İASP	: İki Aşamalı Stokastik Programlama
İMM	: İşlenebilecek Malzeme Miktarı
KD	: Kapalı Döngü
KEM	: Tersine Lojistik Tesislerini Etkileyen Kötü Etkilerin Minimizasyonu
KM	: Kar Maksimizasyonu
KSM	: Kalite Seviyesi Maksimizasyonu
KTDP	: Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama
KTDP	: Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama
KTHP	: Karma Tamsayılı Hedef Programlama
KTP	: Karışık Tamsayılı Programlama
M	: İhtiyaç Duyulan Makine Sayısı
MBBD	: Mükemmel Bilginin Beklenen Değeri
MCV	: Müşteriye Cevap Verme Yeteneği Maksimizasyonu
MM	: Maliyet Minimizasyonu
N	: Senaryo Sayısı
NRWM	: Uygun Olmayan Atık Kâğıt Hedefi Minimizasyonu
Oc	: Operasyonel Maliyetler
OEM	: Orijinal Ekipman Üreticileri
P	: Toplama Periyodunun Gün Cinsinden Uzunluğu
Pc	: Üretim Maliyeti
Pv	: Üretim Hacmi
Q	: Kalite
R	: Geri Dönen Ürün Miktarı
Rc	: Geri Dönen Bileşen Miktarı
RcQ	: Geri Kazanılan Ürün Miktarı
Rcv	: Geri Kazanım Oranı
REC	: Bölgesel Çevre Merkezi
RIA	: Düzenleyici Etki Analizi
RLND	: Reverse Logistics Network Design
RO	: Robust Optimizasyon
RoHS	: Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment
Rpc	: Yeniden İşleme Maliyeti
Rr	: Geri Dönüş Oranı
RT	: Rafineri Tesisi
SAA	: Örneklem Ortalama Yakınsaması
SBP	: Stokastik-Bulanık Programlama
SBSM	: Scenario Based Stochastic Modeling
Sc	: Ürün Satış Fiyatı
SÇD	: Stokastik Çözüm Değeri
SÇGD	: Stokastik Çözümün Görelî Değeri
SE	: Sezgisel Metot
Sim	: Simülasyon
SKTDP	: Stokastik Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama
SP	: Stokastik Programlama
SPM	: Stochastic Programming Model
T	: Herbir Tesise Gönderilecek Ürün Miktarı
TB	: Tavlama Benzetimi
Tc	: Taşıma Maliyeti

TÇ	: Tam Çözüm Veren Metot
TDP	: Tamsayılı Doğrusal Programlama
TL	: Tersine Lojistik
TLAT	: Tersine Lojistik Ağ Tasarımı
TM	: Toplama Noktaları
TP	: Tamsayılı Programlama
TS	: Tedarik Süresi
V	: İhtiyaç Duyulan Araç Sayısı
Vc	: Değişken Maliyetler
VSS	: Value of Stochastic Solution
WEEE	: The Waste Electrical and Electronic Equipment
WRTM	: Atık Kağıt Geri Kazanım Maksimizasyonu
WS	: Wait-and-See Solution
Y	: Tesislerin Açılıp Açılmama Kararı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: İleri ve tersine lojistik arasındaki farklılıklar.	18
Çizelge 2.2: Bazı ülkelerinde kişi başına üretilen AEEE miktarları.	21
Çizelge 2.3: RoHS kapsamında kullanımı sınırlandırılan maddeler.	24
Çizelge 2.4: AEEE kişi başına hedeflenen yıllık e-atık toplama miktarları.	28
Çizelge 2.5: AEEE geri dönüşüm oranı hedefleri.	29
Çizelge 2.6: AEEE geri kazanım oranı hedefleri.....	29
Çizelge 3.1: Sınıflandırmada yer alan ifadeler ve karşılıkları.	47
Çizelge 3.2: Deterministik modeller ile ilgili TLAT ve modellenmesi yazın çalışmaları.	48
Çizelge 3.3: Stokastik programlama ile ilgili TLAT yazın çalışmaları.	51
Çizelge 3.4: Robust optimizasyon ilgili TLAT yazın çalışmaları.	52
Çizelge 3.5: Yazındaki çalışmaların modelleme türüne göre sınıflandırılması.....	53
Çizelge 3.6: Yazındaki deterministik modellenli çalışmaların ağ türüne göre sınıflandırılması.	54
Çizelge 3.7: Yazındaki SP modellenli çalışmaların ağ türüne göre sınıflandırılması. ...	54
Çizelge 3.8: Yazındaki deterministik modellenli çalışmaların model türüne göre sınıflandırılması.	55
Çizelge 3.9: Yazındaki SP modellenli çalışmaların model türüne göre sınıflandırılması.	56
Çizelge 3.10: Yazındaki deterministik modellenli çalışmaların amaç sayısına göre sınıflandırılması.	57
Çizelge 3.11: Yazındaki SP modellenli çalışmaların amaç sayısına göre sınıflandırılması.	57
Çizelge 3.12: Yazındaki deterministik modellenli çalışmaların amaç türüne göre sınıflandırılması.	59
Çizelge 3.13: Yazındaki SP modellenli çalışmaların amaç türüne göre sınıflandırılması.	60
Çizelge 3.14: Yazındaki deterministik modellenli çalışmaların ürün sayısına göre sınıflandırılması.	61
Çizelge 3.15: Yazındaki SP modellenli çalışmaların ürün sayısına göre sınıflandırılması.	62
Çizelge 3.16: Yazındaki deterministik modellenli çalışmaların çözüm metoduna göre sınıflandırılması.	62
Çizelge 3.17: Yazındaki SP modellenli çalışmaların çözüm metoduna göre sınıflandırılması.	63
Çizelge 3.18: Yazındaki SP modellenli çalışmaların ürün türüne göre sınıflandırılması.	64
Çizelge 3.19: Yazındaki deterministik modellenli çalışmaların belirsizlik türüne göre sınıflandırılması.	65
Çizelge 3.20: Yazındaki SP modellenli çalışmaların belirsizlik türüne göre sınıflandırılması.	66
Çizelge 3.21: TLAT belirsizlik literatür özet.	68

Çizelge 5.1: Tesis kapasiteleri.	102
Çizelge 5.2: Tesis açılış maliyetleri (TL).	102
Çizelge 5.3: Toplama noktasından ayıklama tesisine birim ürün taşıma maliyeti (TL).	102
Çizelge 5.4: Ayıklama tesisinden geri dönüşüm ve bertaraf merkezlerine birim ürün taşıma maliyeti (TL).	102
Çizelge 5.5: Geri dönüşüm merkezinden rafine tesisi, hammadde pazarı ve bertaraf merkezine birim ürün taşıma maliyeti (TL).	102
Çizelge 5.6: Tesislerde ürün işleme ve elden çıkarma maliyetleri (TL).	103
Çizelge 5.7: Atık ürün toplama maliyetleri (TL).	103
Çizelge 5.8: Rafine tesisinde ürün rafine getirileri (TL).	103
Çizelge 5.9: Ürünlerin içindeki malzeme oranları.	103
Çizelge 5.10: Geri dönüşüm merkezinden hammadde pazarı, bertaraf merkezi ve rafine tesisine giden ürün oranları.	103
Çizelge 5.11: Toplama noktaları ile ayıklama tesisleri arasındaki mesafeler (km).	103
Çizelge 5.12: Ayıklama tesisleri ile geri dönüşüm ve bertaraf merkezi arasındaki mesafeler (km).	104
Çizelge 5.13: Geri dönüşüm merkezi ile hammadde pazarı, bertaraf merkezi ve rafine tesisi arasındaki mesafeler (km).	104
Çizelge 5.14: Farklı senaryolarda toplanan atık miktarları (Ton).	104
Çizelge 5.15: Farklı senaryolar için ayıklama tesislerindeki ayıklama oranları.	104
Çizelge 5.16: Toplama noktalarına gelen atık ürün miktarları (ton).	105
Çizelge 5.17: Monolitik SP ve deterministik modelin özeti.	105
Çizelge 5.18: Deterministik model (bekle ve gör problemi) sonuçları.	106
Çizelge 5.19: SP ve deterministik model sonuçları.	106
Çizelge 5.20: Belirsiz parametrelerin olasılık dağılım türleri ve özellikleri.	109
Çizelge 5.21: N=20 için SP modelinin birinci aşama sonuçları.	109
Çizelge 5.22: N=20 için SAA sonuçları.	110
Çizelge 5.23: N=40 için SP modelinin birinci aşama sonuçları.	110
Çizelge 5.24: N=40 için SAA sonuçları.	111
Çizelge 5.25: N=60 için SP modelinin birinci aşama sonuçları.	112
Çizelge 5.26: N=60 için SAA sonuçları.	112
Çizelge 5.27: SP modeli çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması.	114
Çizelge 5.28: 10 senaryo için SP modeli SAA çözümü.	114
Çizelge 5.29: Deneysel çalışma problem büyüklükleri.	115
Çizelge 5.30: Deneysel çalışma senaryo sayıları.	115
Çizelge 5.31: Deneysel problem çözümleri.	116
Çizelge 5.32: Deneysel 10*5*1 problemi için SAA çözümleri.	118
Çizelge 5.33: Deneysel 20*10*2 problemi için SAA çözümleri.	120
Çizelge 5.34: Deneysel 30*15*3 problemi için SAA çözümleri.	123
Çizelge 5.35: Deneysel 40*20*4 problemi için SAA çözümleri.	126
Çizelge 6.1: Geri dönüştürülen ürün grupları.	132
Çizelge 6.2: Tersine lojistik ağının yapısı.	132
Çizelge 6.3: TM yıllık kurulum maliyetleri.	133
Çizelge 6.4: TM 'lere ait veriler.	133
Çizelge 6.5: AT'lere ait veriler.	134
Çizelge 6.6: GDM' lere ait veriler.	135
Çizelge 6.7: AT ile GDM arasındaki taşıma maliyetleri.	135
Çizelge 6.8: AT ile BM arasındaki taşıma maliyetleri.	135
Çizelge 6.9: TM ile AT arasındaki taşıma maliyetleri.	136

Çizelge 6.10: GDM ile BM arasındaki taşıma maliyetleri.	136
Çizelge 6.11: GDM ile HP arasındaki taşıma maliyetleri.	137
Çizelge 6.12: GDM ile RM arasındaki taşıma maliyetleri.	137
Çizelge 6.13: Geri dönen ürün miktarına ait üssel dağılım özellikleri.....	137
Çizelge 6.14: Ürün gruplarının kalite dağılımlarının ortalama ve standart sapma değerleri.....	140
Çizelge 6.15: Senaryo tabanlı SP ve deterministik modellerin özeti.....	140
Çizelge 6.16: SP ve deterministik model sonuçları.	141
Çizelge 6.17: Herbir senaryo için deterministik model amaç fonksiyon değerleri.	146
Çizelge 6.18: Farklı senaryo sayıları için elde edilen çözümler.	148
Çizelge 6.19: N=20 için SP modelinin birinci aşama sonuçları.	150
Çizelge 6.20: N=20 için SAA sonuçları.	151
Çizelge 6.21: N=40 için SP modelinin birinci aşama sonuçları.	152
Çizelge 6.22: N=40 için SAA sonuçları.	153
Çizelge 6.23: N=60 için SP modelinin birinci aşama sonuçları.	154
Çizelge 6.24: N=60 için SAA sonuçları.	155
Çizelge 6.25: Farklı senaryo sayıları için SAA çözümü özeti.....	156
Çizelge 6.26: Farklı tekrar sayısı ve senaryo büyüklükleri için SAA çözümleri. ...	158
Çizelge 6.27: SP modeli çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması.	159
Çizelge 6.28: SAA yaklaşımının monolitik SP birinci aşama sonuçları ile çözümü.	160
Çizelge 6.29: Kapasite azaltmanın toplam maliyete etkisi.	162
Çizelge 6.30: Geri dönen e-atık miktarında değişimin toplam maliyete etkisi.	164

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Tersine lojistik ağındaki aktörler	7
Şekil 2.2: Geri kazanım zinciri.	8
Şekil 2.3: Ürün geri alım işlemleri.	10
Şekil 2.4: Tersine lojistikte geri dönüş nedenleri.	14
Şekil 2.5: İleri ve tersine lojistik dağıtım.	18
Şekil 2.6: Batı Avrupa için AEEE bileşenleri.	22
Şekil 2.7: EEE' de bulunan temel malzemeler.	23
Şekil 2.8: AB AEEE yönetmeliğinin genel görünümü.	25
Şekil 2.9: Atık elektrikli ve elektronik eşya toplama miktarları (2006-2009).....	27
Şekil 2.10: Türkiye'de iller bazında kişi başına üretilen AEEE miktarları.	28
Şekil 4.1: Deterministik optimizasyon modeli.	71
Şekil 4.2: Stokastik programlamanın alt bölümleri.	72
Şekil 4.3: Stokastik optimizasyon modeli.	73
Şekil 4.4: Stokastik programlama problemlerinin sınıflandırılması.....	74
Şekil 5.1: GDAT problemi akış şeması.	88
Şekil 5.2: AEEE geri dönüşüm süreci.	89
Şekil 5.3: Geri dönüşüm ağı genel yapısı.	91
Şekil 5.4: Sayısal örnek için tersine lojistik ağı.....	101
Şekil 5.5: Deterministik beklenen değer problemi çözümüne göre tesisler arası taşınması gereken ürün miktarları.	107
Şekil 5.6: Önerilen stokastik model çözümünden elde edilen ürün atama miktarları.	108
Şekil 5.7: Senaryo sayısına göre amaç fonksiyonundaki değişim.	113
Şekil 5.8: Senaryo sayısına göre optimal boşluk değerindeki değişim.	113
Şekil 5.9: Senaryo sayısına farklı problem büyüklüğü için amaç fonksiyonu değişimi.....	117
Şekil 5.10: Senaryo sayısına farklı problem büyüklüğü için çözüm süresi değişimi.....	117
Şekil 5.11: 10*5*1 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için amaç fonksiyon değişimi	119
Şekil 5.12: 10*5*1 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için optimalite boşluğu değişimi	119
Şekil 5.13: 10*5*1 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için çözüm süresi değişimi.....	120
Şekil 5.14: 20*10*2 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için amaç fonksiyon değişimi	121
Şekil 5.15: 20*10*2 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için optimalite boşluğu değişimi	122
Şekil 5.16: 20*10*2 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için çözüm süresi değişimi.....	122
Şekil 5.17: 30*15*3 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için amaç fonksiyon değişimi	124

Şekil 5.18: 30*15*3 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için optimalite boşluğu değişimi	124
Şekil 5.19: 30*15*3 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için çözüm süresi değişimi.....	125
Şekil 5.20: 40*20*4 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için amaç fonksiyon değişimi	127
Şekil 5.21: 40*20*4 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için optimalite boşluğu değişimi	128
Şekil 5.22: 40*20*4 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için çözüm süresi değişimi.....	128
Şekil 6.1: AEEE geri dönüşüm tersine lojistik ağ yapısı.	131
Şekil 6.2: Açılması planlanan kombine geri dönüşüm tesisleri.	132
Şekil 6.3: Alternatif TM, GDM ve AT yerleri.....	133
Şekil 6.4: Geri dönen ürün miktarı dağılımı.	138
Şekil 6.5: Geri dönen ürün miktarı dağılımı (aralığa bölme yaklaşımıyla).	139
Şekil 6.6: Geri dönen ürün kalitesi dağılımı.	139
Şekil 6.7: Deterministik model sonuçları.	142
Şekil 6.8: Stokastik programlama modeli sonuçları.	142
Şekil 6.9: Önerilen stokastik model çözümünden elde edilen ürün atama miktarları.	143
Şekil 6.10: REC tarafından hazırlanan Türkiye AEEE haritası.	143
Şekil 6.11: Monolitik SP modelinin geçerliliği.	145
Şekil 6.12: Farklı senaryo sayıları için elde edilen çözümler.	148
Şekil 6.13: Önerilen model ile farklı sayıda senaryo içeren stokastik model ile arasındaki sapma miktarları.	148
Şekil 6.14: Farklı senaryo için yapılan SAA çözümleri optimal değer değişimi. ...	156
Şekil 6.15: Farklı senaryo için yapılan SAA çözümlerinin optimalite boşluğu değişimi.	157
Şekil 6.16: Farklı örneklem sayıları (tekrar sayısı) ve senaryo büyüklükleri için amaç fonksiyonu değerindeki değişim.	158
Şekil 6.17: Toplam maliyet ve tesis kapasiteleri ilişkisi.....	163
Şekil 6.18: Toplam maliyet ve geri dönen e-atık miktarı.	164

MİKTAR VE KALİTE BELİRSİZLİĞİ ALTINDA TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIMI İÇİN BİR STOKASTİK PROGRAMLAMA MODELİ ÖNERİSİ: ELEKTRONİK ATIK SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA

ÖZET

Son zamanlarda dünyamızda yaşanan hızlı nüfus artışı, doğal kaynakların ve hammaddelerin hızla tükenmeye başlaması ve artan çevre bilinci ile birlikte sınırlı olan kaynakların ve üretilen ürünlerin daha etkin kullanımı ile bu ürün ve kaynakların yeniden kullanımına yönelik çalışmalara olan ilgi hızla artmaktadır. Bunun yanında artan tüketici bilinçliliği, hükümetler tarafından yürürlüğe konulan yeşil kanunların ürünlerin geri getirilmesini zorlamaları, üretici firmaların rekabet avantajını korumak için maliyetleri azaltmayı istemeleri, yeniden kullanılabilir ürün kullanımının artması, kalite yükseltme, yeniden üretme, tamir etme vb. işlemlerin rağbet bulması ile Tersine Lojistik (TL) işletmeler için ilgi çekici hale gelmiştir. Tersine lojistik ağları ise yapısında barındırdığı özellikle atık ürünlerin geri dönüş zaman, miktar ve kalitesindeki belirsizliklerden dolayı ileri yöndeki lojistik ağ tasarımına göre oldukça karmaşık yapıdadır. Günümüzde tersine lojistik önemli bir karlı ve sürdürülebilir iş stratejisi olarak giderek artan bir şekilde önem kazanmaktadır. Tersine lojistiğin efektif uygulaması firmalara bulundukları sektörlerde rekabet avantajı kazandırmaktadır. İşletmeler bu gibi sebeplerden dolayı kullanılmış ürünlerin müşterilerden imalata geri kazanımını, geri dönüşümünü ya da bertarafını içeren tersine lojistiği sistemlerine dâhil etmektedir.

Tersine lojistik ağında ürünlerin kullanıcılarından tesislere taşınması ve buradan da yeniden pazara sunulması için yerleşim yerlerinin tespiti, tesisler ve her bir tesis arasında taşınacak miktarlar, ürünlere hangi geri dönüşüm stratejilerinin uygulanacağı vs. alınması gereken önemli kararlar arasındadır. Alınması gereken bu kararlar Tersine Lojistik Ağ Tasarımı (TLAT) konusunun önemine vurgu yapmaktadır. Çünkü tersine lojistik faaliyetlerini yerine getirmek için firmaların büyük yatırımlar yapması gerekmektedir. Yüksek kurulum maliyetlerine sahip olan böyle bir sistemin tasarımı firma açısından çok önemli bir konu haline gelmektedir. Başarılı bir TL ağ tasarımı firmaların hem maliyet etkin bir geri dönüşüm sürecine sahip olmalarına, hem de pazarda rakiplerine nazaran rekabet avantajı elde etmelerine yardımcı olacaktır.

Bu çalışmada tez çalışması kapsamında atık elektrikli ve elektronik eşyaların geri dönüşüm sürecinin etkin bir şekilde yönetilebilmesi için özellikle tesis yeri seçimi ve ürün atama konusu ile ilgili deterministik ve iki aşamalı stokastik programlama modeli geliştirilmiştir.

Çalışmada geri dönen ürün miktarı ve ayıklama tesisindeki ürünlerin ayıklanması neticesinde geri dönüşüm merkezine gönderilmeye aday olan ürün oranını ifade eden ayıklama oranı ya da ürün kalitesi parametreleri belirsiz olarak varsayılmıştır. Çalışmada ilk olarak tüm model parametrelerinin bilindiği varsayımı altında karmaşık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. İkinci aşamada ise bu modele miktar ve kalite belirsizlikleri ilave edilerek çok aşamalı, çok ürünlü, kapasite ve tesis sayısı kısıtlı iki aşamalı stokastik programlama modeli önerilmiştir. Önerilen modellerin çözümünde GAMS 23.5.1/CPLEX 12.2 optimizasyon programı

kullanılmıştır. Önerilen modeller ilk olarak sayısal örnek üzerinde uygulanmıştır. Deneysel analizler yapılarak farklı problem türleri için önerilen modellerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Belirsizliklerin ifade edilmesinde ise parametrelere ait olasılık dağılımları ilk yaklaşımda aralıklara bölünerek herbir aralığın orta noktası senaryo olarak alınmış ve az sayıda senaryo ile çözüm gerçekleştirilmiştir. İkinci yaklaşımda ise çok sayıda senaryo ile çözüm imkânı sağlayan örneklem yakınsama yaklaşımı kullanılarak çözüm yapılmıştır.

Önerilen stokastik programlama modelinin geçerliliğini test etmek için “mükemmel bilginin beklenen değeri” ve “stokastik çözüm değeri” ölçütleri hesaplanarak Madansky (1960) tarafından geliştirilen geçerlilik eşitliklerine uygunluk şartı incelenmiştir. İkinci geçerlilik testi olarak da uç değer analizi ve tesis kapasitelerinin sıfır ve çok yüksek olduğu durumlar için çözümlere bakılmıştır. Ayrıca geri dönen ürün miktarı ve tesis kapasitesi değişimleri baz alınarak modellerin optimal sonuçlarındaki değişimi gözlemlemek için duyarlılık analizleri yapılmıştır.

İkinci yaklaşım olan örneklem yakınsama yaklaşımı için de üç farklı senaryo değeri için çözümler yapılarak en iyi sonuç veren senaryo sayısı tespit edilmiştir. Sonuçların geçerliliği için güven aralıklarına bakılarak t testi yapılmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen genel tersine lojistik ağ tasarım model İzmit’te elektrikli ve elektronik atıkların geri dönüşümü alanında hizmet vermekte olan üçüncü parti tersine lojistik firmasının ağ tasarım problemine uygulanmıştır. Sonuçlar geliştirilen stokastik programlama modelinin ekonomik açıdan etkin olduğunu göstermekte ve geri dönen ürün miktar ve kalitesi belirsizliğini gidererek yöneticilere stratejik yatırım kararı almada yardımcı olabileceğini göstermektedir.

PROPOSAL OF A STOCHASTIC PROGRAMMING MODEL FOR REVERSE LOGISTICS NETWORK DESIGN UNDER QUANTITY AND QUALITY UNCERTAINTIES: A CASE STUDY IN ELECTRONIC WASTE SECTOR

SUMMARY

Recently, due to the rapid world population growth, decreasing of natural resources and raw materials, increasing environmental awareness, interesting for wasting raw materials, using produced products more efficiently, and reusing of sources is rapidly increasing. In addition, because of growing consumer awareness, the green laws applied by governments to collect and recycle used products, the intending of manufacturers to reduce manufacturing costs in order to maintain its competitive advantage, increasing the use of reusable products, quality upgrading, popularity of re-manufacture, repair, recycling and so on. activities, Reverse Logistics has become attractive for businesses. Reverse logistics network is more complex to forward logistics network because of including uncertainties in terms of time, quantity, and quality.

Nowadays, reverse logistics as an important business strategy for profitable and sustainability is becoming increasingly important. The effective implementation of reverse logistics gives companies a competitive advantage in sectors. Due to mentioned reasons firms intend to incorporate reverse logistics activities such as the recovery, remanufacturing, recycling or disposal.

Reverse logistics is practiced in many industries, including those producing steel, aircraft, computers, automobiles, chemicals, appliances and medical items. Reverse logistics has become increasingly important as a profitable and sustainable business strategy. Therefore, more and more manufacturers have adapted the practice of recovering value from returned products and integrate product recovery activities into their processes.

Consequently, studies in the literature regarding reverse logistics have been concluded on different aspects such as network design, return forecasting, economic and environmental performance, lot sizing, vehicle routing, etc. The design of product recovery networks is one of the challenging reverse logistics problems. In order to manage effectively transportation of used product from customers to recovery facilities, and supplying to market, facility location and allocation problem are among important decisions. These decisions need to be taken emphasize the importance of the issue of reverse logistics network design. Firms have to make large investments to adopt the reverse logistics activities. With high installation costs make system design very important. The successful design of reverse logistics network helps firms to gain cost-effective recycling process, and competitive advantage. However, reverse logistics network design is very difficult to develop an effective reverse logistics network design because of uncertainty.

Uncertainty is one of the characteristics of reverse logistics networks. In particular, the strategic reverse logistics network design has to take uncertainty into consideration. Especially in reverse logistics, the time, quantity, and quality of returned products have a high degree of uncertainty. Therefore, the reverse logistics network should be designed in a way that it could handle the uncertainty in parameters; otherwise the impact of uncertainty will be more than expected. Deterministic models for reverse network design lack the ability to incorporate such uncertainty factors as variances of return amount, timing, and lead time through the network. Kall and Wallace (1994) claim that stochastic programming techniques present more flexibility to cope with uncertainty. So, in order to deal with this uncertainty, researchers developed various stochastic models.

In this study, deterministic and two-stage stochastic programming models have been developed to manage effectively the process of recycling of waste electrical and electronic equipments. Return product quantity and quality related to sorting ratio in sorting centers are assumed uncertain. Firstly, it is developed mixed integer linear programming model by assuming that all model parameters are known. In the second stage of the study, proposed deterministic model is extended by adding the uncertainties in terms of quantity and quality. So it is developed multi-stage, multi-product, the capacity constrained two-stage stochastic programming model. Proposed models is applied for using experimental datas. Then, we generated four test problems at different size for analyzing presented models solution performance.

Uncertainties in two stage stochastic programming are represented by scenarios. There are two approaches to generate scenarios. The first approach is to express uncertainties in the intervals to generated by dividing limited intervals probability distributions of the uncertain parameters. This approach is useful for solving model with small number of scenarios it is called monolithic stochastic optimization model. In the second approach, it was used sample average approximation which enables efficient solutions with large number of scenarios. It is used to code GAMS 23.5.1 and solve proposed model CPLEX 2.12 optimization software.

Validity analysis is applied to both deterministic and two stage stochastic programming models by using extreme value analysis for return quantity and facility capacities. Secondly, Expected Value of Perfect Information and Value of Stochastic Solution were calculated and it was explored appropriate to validity conditions developed by Birge and Louveaux (1997) for two stage stochastic programming. In order to explore the effect of return quantity and facility capacities on the results, a sensitivity analysis is used.

The solution of stochastic programming by using sample average approximation it is generated three scenarios 20,40, and 60 for lower bound and 1000 scenarios to calculate upper bound. t-test is applied to explore confidence intervals of solution.

In this study, proposed general reverse logistics network model is applied with the data of the waste electrical and electronic equipment collection and recycling facility which operates in İzmit-Turkey. It has one of the highest market share in WEEE sector.

E-wastes are collected from distributors, original equipment manufacturers, and municipalities. WEEE recycling network is including twenty-eight collection centers (distributors, original equipment manufacturers, and municipalities) where is located some city in Turkey (İstanbul, Balıkesir, Bursa, Edirne, İzmit, Sakarya, Tekirdağ, Yalova, Aydın, Çanakkale, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla, Afyon, Ankara, Eskişehir,

Kırıkkale, Konya, Niğde, Adana, Antalya, Mersin, Erzurum, Diyarbakır, Samsun, Trabzon, and Zonguldak), seven potential sorting centers, seven sorting centers (j1:İzmit, j2:Tekirdağ, j3:Erzurum, j4:Antalya, j5:Kayseri, j6:Diyarbakır and j7:Zonguldak), five recycling centers (i1:İzmit, i2:Ankara, i3:İzmir, i4:Adana and i5:Samsun), a refinery center and two disposal centers. Returned products are collected from customer zones in collection center where is in electronic markets, municipality etc., then they are sent to sorting centers; it is divided into recoverable products and scrapped products. The recoverable products are transported to the recycling centers and scrapped products are sent to the disposal centers. In our study, it is difficult to predict the amount of returned products because of uncertainty. In the next chapter, we address how to handle uncertainty during RLND. The RLND problem discussed in this case is an open loop, multi-echelon, multi-product, capacity constraint under return quantity and quality uncertainties.

According to solutions, runs of deterministic model were done within 0.031 seconds. Compared to deterministic model, runs of stochastic model were done within 1.104 seconds. Deterministic model running time is lower than SBSM because of the complexity of stochastic model. In monolithic approach six scenarios are generated for quantity uncertainty and three scenarios are generated for quality uncertainty. The deterministic model, which is called as expected value solution, is developed by using the mean value of eighteen scenarios. Total cost of expected value solution 2.886.286,013 TL. The deterministic model, called as wait and see solution, that each scenario separately is solved and the mean of objective functions is considered as wait-and-see solution. Total cost of deterministic model as wait and see solution is 3.064.804,78 TL and total cost of the stochastic programming model 3.079.588,666 TL.

According to the results of deterministic model, İzmit, Tekirdağ and Kayseri are opened as sorting centers and also İzmit is opened as recycling center. In the result of the SPM, İzmit, Tekirdağ and Kayseri are opened as sorting centers. İzmit is selected as recycling center. This solution also is supported by historical data related to product returns quantity from customers. Generally, the choices are meaningful because of chosen location for sorting and recycling centers are nearer to the industrial zones this will cause a decrease in transportation cost and response time. Therefore, it can be concluded that results of the SPM propose acceptable solution in term of economic perspective. The developed model can help managers to handle uncertainty of return amount, in the process of making strategic decision on facility location selection.

A general question in the stochastic programming is whether this approach can be nearly optimal. The theoretical answer to this question is provided by two concepts: the expected value of perfect information (EVPI) and the value of stochastic solution (VSS). EVPI measures the maximum value a decision maker would be ready to pay in return for complete (and accurate) information about the future. The EVPI is difference between the wait-and-see solution (WS) approach and the stochastic programming.

In the WS approach, each scenario separately is solved and the mean of objective functions is considered as wait-and-see solution. In this study, the mean of objective functions are calculated as WS= 3.064.804,78 TL. The expected value of perfect information is 13.763,886 TL, by definition, the difference between the wait-and-see and the here-and-now solution.

To compute the VSS, first the mean value of each stochastic parameter is taken and the model is solved by mean of each parameter, known in the literature as expected value (EV) approach. Then the optimal variables of EV approach are considered as an input for two-stage model and it is allowed that second-stage decisions to be chosen optimality as functions of EV solution and stochastic parameters, known in the literature as EEV approach. The difference between the objective functions of EEV approach and stochastic program would be VSS. $VSS = 0$ TL. This quantity is the cost of ignoring uncertainty in choosing a decision. Lastly, it is applied validity analyzes generated by Madansky (1960) for two stage SP.

Proposed model is solved with different parameters to determine the effects of some parameters on total cost. In other words, the validation of the solution and sensitivity analyzes of the proposed model is conducted. In sensitivity analysis phase, we conducted some sensitivity analysis on scenario size, return quantity, facility capacities to investigate the effects of these parameters on the objective values. Firstly proposed SPM is solved for 9,12,15,18, 21 and 30 scenario size. According to the solutions least cost for proposed model is gathered for 15 and 18 scenarios as 3.079.588,6 TL. Feasible solution cannot be found for 21 and 30 scenarios.

Secondly, proposed deterministic and monolithic SPM are run by decreasing sorting centers and recycling centers capacities from %5 to %80. When the capacities are decreased more than 40 %, the proposed SPM gives infeasible solution. To find feasible solution, the new centers should be open for recycling or sorting centers. Third sensitivity analysis is proposed to analyze return quantity changing on the solutions. Developed deterministic and monolithic SPM are run by increasing from %10 to %100. When the quantity is increased more than 30 %, the proposed SP model gives infeasible solution. In addition, when the quantity is increased more than 100 %, the proposed deterministic model gives infeasible solution. In order to find feasible solution, the new centers should be open for recycling or sorting centers.

At second part of the study it is proposed sample average approximation method to solve SPM with large scenarios. The solution quality of sample average approximation depends on sample size. The solution of stochastic programming by using sample average approximation it is generated three scenarios 20,40, and 60 for lower bound and 1000 scenarios to calculate upper bound. Replication number is selected 20 due to give good solution at all sample size for statistical goals. T-test is applied to explore confidence intervals of solution. According to solutions, the best value for total cost is gathered by scenerio size 60 as 1.354.451,39 TL. It is not sufficient to take minimum cost for sample average approximation and also optimality gap should be small. Among the solution, optimality gap is at the least level for scenerio size 60 as 1,974%. To analyz validity of solution T-test is applied for %95 and %90 confidence interval respectively. Then the solution is appropriate for given confidence intervals. In addition, according to solution, SAA solution is %14 better than monolithic SP solution value under same conditions.

The results show that the developed two stage stochastic programming model is efficient point of view economical. In addition, proposed models helps to managers to make efficient decisions under quantity and quality uncertainties.

To the best of our knowledge, this research contributes the literature as one of the primary works proposed multi-product, multi-echelon RLND with uncertainties

under quantity and quality, and by using real life data. Second contribution is that we presented generic multi-product, multi-stage RLND for third part RL firm. Several extensions of this model may be considered for future directions. For instance, other uncertainties such as time, quality, transportation cost, processing cost, and capacity uncertainties can be addressed. Heuristics methods can be developed to increase computational performance quality. To take into consideration uncertainties, fuzzy programming, robust programming, fuzzy-stochastic programming models can be proposed. In addition, multi objective functions should be considered by adding objective function besides cost minimization, profit maximization and cost minimization, customer satisfaction, environmental effect minimization, recycling performance.

1. GİRİŞ

Son zamanlarda yaşanan hızlı nüfus artışı, iklimsel değişimler, doğal kaynakların tükenmesi ve artan çevre bilinci ile birlikte sınırlı olan kaynakların ve üretilen ürünlerin daha etkin kullanımı ile bu ürün ve kaynakların yeniden kullanımına yönelik çalışmalara olan ilgi hızla artmaktadır. Artan tüketici bilinçliliği, hükümetler tarafından uygulanan yeşil kanunların ürünlerin geri getirilmesini zorlamaları, üreticilerin daha düşük işletme sermayesi ile maliyeti azaltmayı istemeleri, yeniden kullanılabilir konteynerlerin kullanımının artması, hizmet talebinin artması, kalite yükseltme, yeniden üretme, tamir etme vb. işlemlerden dolayı Tersine Lojistik (TL) işletmeler için ilgi çekici hale gelmiştir (Şengül, 2009). Ayrıca günümüzde pek çok ülkede firmalar, ürettikleri ürünlerin belirli bir kısmını geri toplamakla sorumlu tutulmaktadır. Buna göre Almanya’da 1991 yılında yürürlüğe giren yönetmeliğe göre firmalar satmış oldukları ürünlere ait paketlerin en az %60 - %75’ini geri dönüştürmekle yükümlüdürler. Kanuni yaptırımların yanında müşteriler gün geçtikçe bilinçlenmekte ve çevre konusunda daha duyarlı hale gelmektedir. Yeşil imajı önemli bir pazarlama aracı olarak kendini göstermektedir. Bu durum birçok firmayı ürünlerinin geri dönüşüm ve geri toplama seçeneklerini araştırmaya itmektedir. Tersine lojistiğin etkin uygulaması firmalara bulundukları sektörlerde rekabet avantajı sağlamaktadır. Ayrıca yeniden kullanıma kazandırılmış ürünlerin yenilerine nazaran daha az kaynak gereksinimine sebep olması gibi ekonomik unsurlar da ürünlerin iyileştirilmesinde tetikleyici rol oynamaktadır. Bu yüzden sadece ileri yönde etkili bir akış sağlayan bir lojistik ağı artık yeterli olmamakta, ürünlerin yeniden kazanımı için kullanılmış ve iyileştirilmiş ürünlerin akışına imkân veren uygun tersine lojistik yapıların oluşturulması gerekmektedir. Günümüzde tersine lojistik faaliyetleri firmalar için karlı ve sürdürülebilir iş stratejisi olarak giderek artan bir şekilde önem kazanmaktadır. İşletmeler bu gibi sebeplerden dolayı kullanılmış ürünlerin müşterilerden imalata geri kazanımını, geri dönüşümünü ya da bertarafını içeren tersine lojistiği sistemlerine dâhil etmektedir. Amaç, kullanılmış ürünlerden çevreye olan zararlı etkileri en aza indirmek, üretim maliyetlerini

düşürmek, rekabet avantajı elde etmek vb. kullanılmış ürünlerden maksimum faydayı sağlamaktır. Tüm bu sebeplerden ötürü ürün geri toplama yasaları çıkmadan önde Kodak, FujiFilm, Hewlett–Packard, IBM Europe ve Xerox vb. firmalar gönüllü olarak ürün geri kazanım faaliyetlerine katılım göstermişlerdir (Qiang ve diğ, 2013).

Tersine lojistik ağında, ileri lojistik ağında bulunanlardan farklı olarak daha fazla birim yer almaktadır. Tersine akış içeren tedarik zinciri, ileri lojistik ağının tüm elemanlarına ek olarak, talep noktası olarak görev yapan 3. parti lojistik firmaları, ikincil pazarlar, bertaraf merkezleri, toplama noktaları ve daha fazlasından oluşmaktadır. Ürünlerin kullanıcılarından tesislere taşınması ve buradan da yeniden pazara sunulması için yerleşim yerlerinin tespiti, tesisler ve her bir tesis arasında taşınacak miktarlar, ürünlere hangi geri dönüşüm stratejilerinin uygulanacağı alınması gereken önemli kararlar arasındadır. Alınması gereken bu kararlar tersine lojistik ağ tasarımı konusunun önemine vurgu yapmaktadır. Çünkü tersine lojistik faaliyetlerini yerine getirmek için firmaların büyük yatırımlar yapması gerekmektedir. Yüksek kurulum maliyetlerine sahip olan böyle bir sistemin tasarımı çok önemli hale gelmektedir. Bu hususta yazındaki tersine lojistikle ilgili çalışmalar incelendiğinde de, ağ tasarımı, geri dönüş oranı tahminleri, ekonomik ve çevresel performans, stok yönetimi, araç rotalama vb. farklı perspektiflerden konuya yaklaşım gösterildiği görülmektedir. Bununla beraber, problem alanlarından en çok üzerinde durulan problemin TLAT problemi olduğu görülmektedir. TLAT konusu son zamanlarda akademisyenlerin büyük ilgisini çekmektedir. Fakat bu konuda literatürde bir takım açıklar bulunmaktadır.

Belirsizlik ileri yönde lojistik ağlarına nispeten tersine lojistik ağlarının en temel özelliklerinden biridir. Özellikle tersine lojistik ağlarının stratejik tasarımında belirsizlik dikkate alınması gereken bir husustur. Belirsizlik kavramı parametrelerin kesin olarak belirlenmesinin zor olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Modeldeki bazı veya tüm parametreler belirsiz olduğu problemlere stokastik programlama problemleri adı verilir. Stokastik programlamanın temelinde işlenen konu, problemle ilgili olan değişkenlerin kullanılmasıyla belirsizliğin ifade edilmesidir. Deterministik programlama (DP) modelleri belirsizlikleri göz önüne almadığı için gerçek hayat uygulamalarını doğru bir şekilde yansıtamamaktadır. Stokastik programlama, belirsiz parametreleri olasılık dağılımları ile ifade ederek modele dahil etmektedir. Amaç, olası tüm veriler için uygun bir çözüm bulmak ve rassal değişkenlerin beklenen

değerini maksimize etmektir. TLAT problemleri için stokastik programlama (SP) modelleri arasında en çok tercih edilen iki aşamalı stokastik programlama (İASP)'dir.

Bu çalışmada belirsizlikler altında TLAT problemi ele alınmış ve bir model önerisinde bulunulmuştur. Önerilen geri dönen ürün miktarı ve kalitesi belirsizlikleri altında, model çok ürünlü, çok aşamalı senaryo tabanlı stokastik programlama modelidir. Çalışmanın amacı TLAT ile ilgili literatürün irdelenip açıkların tespit edilmesi ve özellikle problemin tabiatında bulunan belirsizliklerin dikkate alınarak bu yönde karar vericilere karar verme sürecini kolaylaştıran bir model önerilmesidir.

Bu tez çalışmasında yazına birkaç yönden katkıda bulunulmuştur. İlk olarak incelenen yazın çalışmalarına göre tersine lojistik ağ tasarımı geri dönüşüm opsiyonu için kalite ve miktar belirsizliklerini aynı ele alan ilk çalışmadır.

İkinci olarak belirsiz parametreler altında tersine lojistik ağ tasarımı yaparken önerilen SP modelinin çözümünde iki farklı yaklaşım uygulanmıştır. Birinci yaklaşım belirsizliklerin az sayıda senaryo ile ifade edildiği ve SP modelinin monolitik eşdeğer tam sayılı doğrusal programlama modeline dönüştürülerek çözüm yapılması söz konusudur. İkinci yaklaşımda ise belirsizliklerin çok sayıda senaryo ile ifade edilerek modelin optimal çözümünün geleneksel yöntemlerle çözülemediği durum için SAA tekniği ile önerilen SP modelinin çözümü yapılmıştır. Çalışma geliştirilen SP modelinin çözümünde iki farklı yaklaşım önermesi açısından da yazında katkıda bulunulmuştur.

Üçüncü olarak çalışmada incelenen yazın çalışmaları açısından bakıldığında ilk defa AEEE sektöründe hizmet vermekte olan üçüncü parti tersine lojistik firmaları için genel bir ağ tasarımı yapılmıştır.

Dördüncü olarak önerilen modelde geri dönüşüm TL ağı için bazı yeni kısıt ve değişkenler kullanılmıştır.

Ayrıca çalışmada geliştirilen model İzmit'te elektrikli ve elektronik atıkların geri dönüşümü alanında hizmet vermekte olan üçüncü parti lojistik firmasının ağ tasarım problemine uygulanmıştır. Sonuçlar geliştirilen stokastik modelin ekonomik açıdan etkin olduğunu göstermekte ve geri dönen ürün belirsizliğini gidererek yöneticilere stratejik yatırım kararı almada yardımcı olmaktadır.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde tersine lojistik kavramı ve ele alınan problem yapısı detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde, TLAT ile ilgili yazın taraması yapılmıştır. Bu bölümde öncelikle deterministik programlama modeli öneren çalışmalar, hemen akabinde de belirsizlikleri dikkate alan stokastik programlama modeli öneren çalışmalar incelenerek bir tablo ile yazın taraması özetlenmiştir. Daha sonra ise yazın taraması sonuçları değerlendirilerek yazındaki boşluklar tespit edilmiştir.

Dördüncü bölümde, tez kapsamında istifade edilen modelleme ve çözüm tekniğinden bahsedilmiştir. Bu bağlamda stokastik programlama, iki aşamalı stokastik programlama tekniği, mükemmel bilginin değeri, stokastik çözüm değeri ve örneklem yakınsama yaklaşımı konuları ele alınmıştır.

Beşinci bölümde, önerilen deterministik ve stokastik programlama modelleri sunulmuştur. Bu bölümde ayrıca önerilen modellerin sayısal örnek üzerinde uygulaması yapılmıştır. Deneysel çalışma ile de farklı büyüklüklerdeki problem türleri için çözümler yapılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir.

Altıncı bölümde geliştirilen modellerin “elektrikli ve elektronik eşyalar” (EEE) için gerçek hayat verileri kullanılarak uygulaması gerçekleştirilmiş ve sonuçlar sunularak geçerlilik analizleri yapılmıştır. Son bölümde ise sonuç ve değerlendirmeler yapılarak, gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. TERSİNE LOJİSTİK

2.1 Tersine Lojistik Tanımı ve Kapsamı

Literatürde TL kavramı için bir takım farklı tanımlamalar bulunmaktadır:

Tersine lojistik kavramı ile ilgili olan ters kanallar ya da tersine akış terimleri bilimsel yazında Guiltinan ve Nwokoye (1974) ve Ginter ve Starling (1978) ilk olarak yetmişli yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Seksenli yıllarda tersine lojistik tedarik zincirindeki geleneksel ileri yöndeki akışa zıt olarak geri yönde akış olarak diğer bir deyişle yanlış yönde gitmek tabiri ile tanımlanmıştır (De Brito, 2004).

Lojistik Yönetim Konseyi (The council of logistics management), tersine lojistikle ilgili bilinen ilk tanımını 1990'lı yıllarda yapmıştır. Tersine lojistik kavramı; “hammaddelerin, halen süreçte bulunan envanterlerin, bitmiş malların ve bunlar hakkındaki bilginin tüketim noktasından üretim noktasına tekrar değer elde etme veya düzgün bir şekilde elden çıkarma amacıyla verimli ve maliyet etkin akışını planlama, yürütme ve kontrol etme sürecidir” (Yongsheng ve Shouyang, 2008).

Pohlen ve Farris (1992) TL'yi, ürünlerin dağıtım kanalında tüketiciden üreticiye doğru olan akışı şeklinde tanımamıştır.

Amerika Tersine Lojistik İcra Konseyi'nin TL tanımı şu şekildedir: “hammadde, süreç içi envanterin, bitmiş ürün ve bunlarla ilişkili bilgilerin tekrar kazanımı veya uygun bir şekilde yok edilmesi amacıyla, tüketim noktasından kaynak noktasına doğru maliyet etkin ve etkili bir şekilde planlanması, uygulanması ve kontrolü sürecidir.” TL faaliyetlerinin tüm lojistik faaliyetleri içinde önemli bir payı vardır (Rogers ve Tibben-Lembke, 1999).

Stock (1992) tersine lojistiği, “ürün dönüşleri, kaynak azaltma, geri kazanım, materyal ikamesi, materyallerin yeniden kullanımı, atıkların yok edilmesi ve yakılması, tamir ve yeniden üretimde lojistiğin rolü” olarak tanımlamıştır.

Tersine lojistik, farklı açılardan ele alınabilir. Temel olarak üç açıdan karakterize edilebilir ve buna uygun tanım yapılabilir (Fleischmann, 2000):

1. Tersine lojistik, lojistik sistemlerin büyüyen elemanı olarak görülmektedir. Geleneksel olarak tedarik zincirleri tek yönlü yapı ile tanımlanmışlardır. Ganeshan ve diğ. (1998)'de belirttiği gibi “ tedarik zincirinin en çok bilinen tanımı tedarikçi, üretici, dağıtıcı, perakendeci ve müşterilerden oluşan sistemdir. Bu sistemde ürün akışı tedarikçiden müşteriye doğru ve bilgi akışı her iki yönde olur.” Tersine lojistik ters yönde ürün akışı olarak tanımlanmıştır. Ancak organizasyonlarda malzeme akışının aşağı doğru sınıflandırılmadığı lojistik ağının geliştiği görülmektedir. Bu durumda tersine akışların resmin bütününden ayrılması doğru değildir.

2. Tersine lojistik, orijinal kullanımı tamamlanmış veya kullanılması olanaklı olmayan ikincil ürünlerin akışı olarak düşünülür. Bu nedenle, tersine lojistik plânlanan veya gerçekten fark edilen geçmiş kullanım türevlerinden söz etmektedir. Amaç, imha ya da bazı geri kazanım formları ile açığa çıkan ürünlerin ekonomik değerini en büyük yapmaktır.

3. Tersine lojistik daha çok alıcı tarafı ifade etmektedir. Bu yüzden tersine lojistik, tedarik lojistiğinin özel bir durumudur, denilebilir.

Tersine lojistik, geleneksel tedarik zincirinin aksi yönde malzemenin yeniden kazanılması ya da uygun yöntemle yok edilmesi amacıyla, ikincil malzeme depolarının, malzeme akışının ve ilişkin bilginin verimli ve etkili planlanması, uygulanması ve kontrol edilmesi işlemleridir (Fleischmann ve diğ, 2001). Tersine lojistik işletme bünyesine girmesiyle geleneksel üretim çevresi, geri kazanım üretim çevresi olarak adlandırılmaya başlanmıştır.

Özet olarak, TL tanımları ters yönde akış vurgusundan zamanla çevresel sorumluluk bakışını vurgulamaya kadar zamanla değişim göstermiştir. Sonuç olarak tüm bu tanımlamalar ve geçen zaman TL'nin sahasını genişlettiğini göstermektedir (De Brito, 2004).

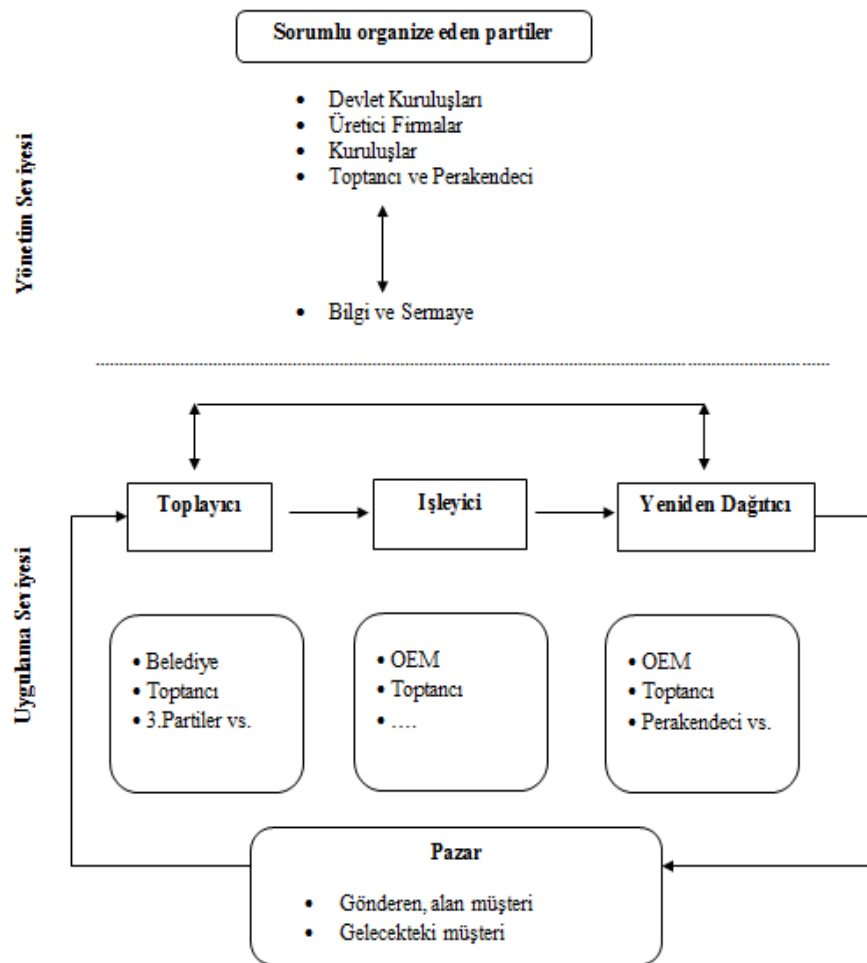
2.2 Tersine Lojistikte Rol Oynayan Aktörler

Tersine lojistikte rol oynayan aktörler için farklı bakış açıları olmakla birlikte genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Dekker ve diğ, 2004; De Brito, 2004; Efendigil ve diğ, 2008):

- İleri tedarik zinciri aktörleri (tedarikçiler, üreticiler, toptancılar, perakendeciler vb.)

- İhtisaslaşmış tersine zincir oyuncuları (toptancı ve geri dönüşüm uzmanları vb.)
- Fırsatçı oyuncular (yardım kuruluşları vb.)
- Kamu kurumları (Belediyeler vb.)

Bu oyuncular yönetim ve yürütme rollerini üstlenmektedirler (De Brito, 2004). Bazı oyuncular zincirdeki basit görevleri yürütmekten sorumlu iken bazı oyuncular ise tersine zincirden ya da organizasyonundan sorumludur. Toplama ve işleme gibi tersine lojistik aktivitelerindeki aktörler şunlardır: bağımsız ara elemanlar, özel geri kazanım firmaları, üçüncü parti tersine lojistik servis sağlayıcıları, atık toplama hizmeti veren belediyeler ve geri dönüşüm işi ile ilgilenen kamu ya da özel kuruluşlarıdır(Dekker ve diğ, 2004). Tersine lojistik aktörlerinin her birinin farklı amaçları olmakla beraber bunlar birbirleriyle rekabet içerisinde bulunmaktadır(Efendigil ve diğ, 2008). Üreticinin geri dönüşümü işindeki amacı, toptancıların ürün satışını yaparken düşük fiyat koymalarını engellemek olabilir (Dekker ve diğ, 2004). Şekil 2.1’de bu bakış açısı açıkça görülmektedir.



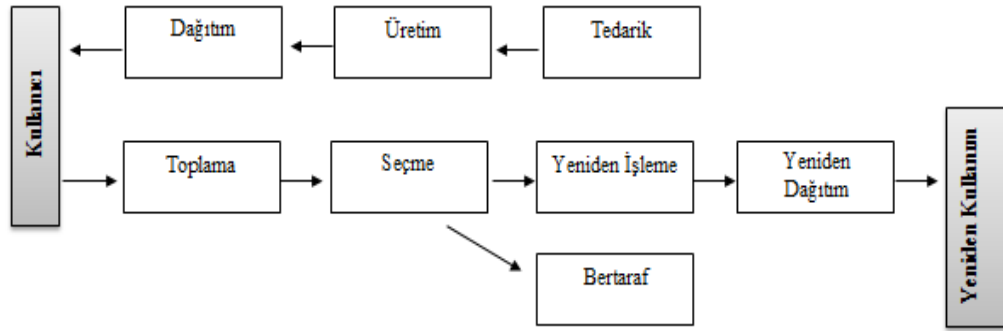
Şekil 2.1: Tersine lojistik ağındaki aktörler.

Şeklin üst kısmındaki orijinal ekipman üreticileri (OEM) gibi ileri tedarik zinciri elemanları, sorumlu olan ya da kanunlarca sorumlu sayılan taraflardır. Yürütme seviyesinde toplayıcılar, işleyiciler, dağıtıcılar gibi farklı taraflar ya da devletin kendisi de bulunabilir. Yönetme ve yürütme seviyeleri arasında bilgi ve sermaye akışı bulunmaktadır (De Brito, 2004; Dekker ve diğ, 2004). Bu tarafların altında iki ana tersine lojistik faaliyeti olan toplama ve işleme vardır. Bu işlemler, farklı taraflar tarafından yapılabilir. Bundan sonra ürün pazara yeniden dağıtılır (Dekker ve diğ, 2004).

2.3 Tersine Lojistik Faaliyetleri

Tersine lojistik ağı genel olarak aşağıdaki adımları içermektedir (Fleischmann ve diğ, 2000):

- Toplama
- Muayene/Ayırma
- Yeniden işleme
- Elden çıkarma
- Yeniden dağıtım



Şekil 2.2: Geri kazanım zinciri.

2.3.1 Toplama

Kullanılmış ürün ya da malzemelerin işlenmesi için tüketiciden toplanması ve işleneceği noktaya kadar olan taşınması ile ilgili tüm faaliyetleri kapsamaktadır (Fleischmann ve diğ, 2000; Şengül, 2009). Örneğin, kullanılmış halıların halı satıcısından ve kullanılmış fotokopi makinelerinin kullanıcıdan geri toplanması buna örnek olarak gösterilebilir (Fleischmann ve diğ, 2000). Toplama; kullanılmış ürünün elde edilmesi, taşınması ve depolanması işlemlerini kapsar (Kumar ve Malegeant,

2006). Toplama işi işletmenin kendi imkânlarıyla ya da 3. parti sağlayıcıları aracılığı ile yapılır (Demirel ve Gökçen, 2008a).

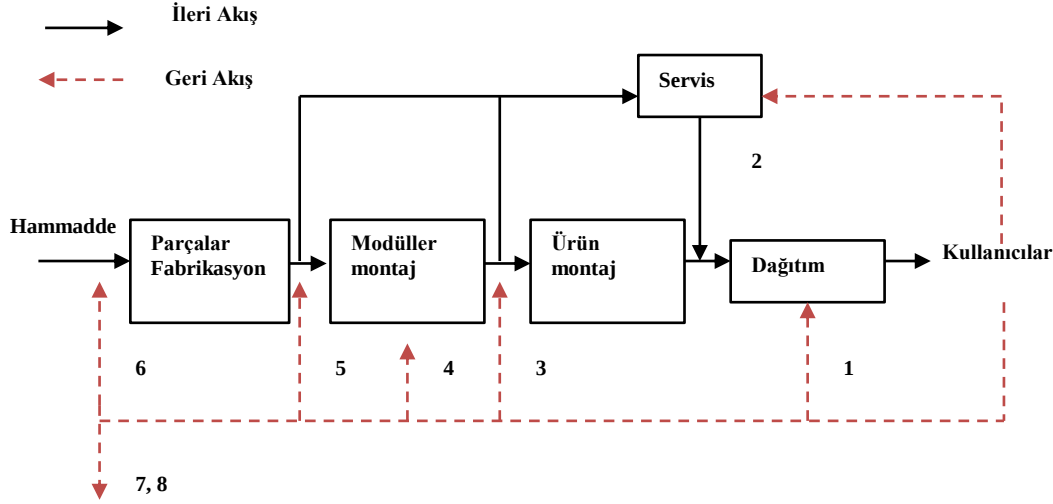
2.3.2 Muayene ve ayıklama

Toplanan ürünlerin yeniden kullanılabilir olup olmadığını ve ne şekilde kullanılabileceğini belirleyen aktiviteleri içermektedir. Çeşitli geri kazanım ve elden çıkarma işlemleri için toplanan ürünlerin üretici firma eline geçmeden önce muayene ve ayıklama işlemlerine tabi tutulmasıdır. Bu işlemlere lokal elemeye denilmektedir. Lokal eleme, geri dönen ürünlerin toplama noktasında yapılır. Bu aşamada ürün yeniden işlenmeli mi, yoksa elden çıkarılmalı mı kararı alınır (Fleischmann, 2000). Muayene ve ayıklama aşamasında; test etme, demontaj, küçük parçalara ayırma, sınıflandırma ve depolama işlemleri yapılır (Fleischmann ve diğ, 2000).

2.3.3 Yeniden işleme ya da doğrudan geri kazanım

Doğrudan geri kazanım, ürünlere herhangi bir işlem yapılmaksızın yeniden satışa ya da tekrar kullanıma gönderilmesidir. Yeniden işleme, kullanılmış bir ürünün yeniden kullanılabilir bir ürüne dönüştürülmesi aşamasıdır Bu aşama geri dönüşüm, tamir ve yeniden üretim gibi farklı seçenekleri içermektedir. Bu seçeneklere ilave olarak, temizleme, yenileme ve yeniden monte etme gibi adımları da içerebilir. Yeniden işlemeye kullanılmış halılardan naylon geri dönüşümü, kullanılmış fotokopi makinelerinden yeni parça üretimi, atık inşaat kumunun temizlenmesi gibi örnekleri vardır (Fleischmann ve diğ, 2000).

Tersine lojistik sistemleri birbirinden ayıran en önemli farklılık bu aşamada meydana gelmektedir (Demirel ve Gökçen, 2008a). Yeniden işleme süreci tersine lojistik ağı içerisinde en yüksek yatırım gerektiren aşamadır. Özellikle yeniden üretim ve geri dönüşüm işlemlerinin maliyeti yüksektir. Asıl farklılık yeniden işleme aşamasında kendini gösterir. Buna göre ürün geri kazanım süreçleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Thierry ve diğ, 1995):



Şekil 2.3: Ürün geri alım işlemleri (Thierry ve diğ, 1995).

- **Tamir:** Tamiratın amacı, geri dönen kullanılmış ürünü yeniden çalışır veya kullanılabilir hale getirmektir (Thierry ve diğ, 1995). Ürünün tamirat işlemi, kırılmış veya bozulmuş parçaların tamiri ve değiştirilmesini içerir (Karaçay, 2005). Tamir görmüş ürün kalitesi yeni ürünün kalitesinden daha düşüktür (Wadhwa ve diğ, 2009).
- **Ürün yenileştirme veya makyajlama:** Ürün yenileştirmenin amacı, kullanılmış ürünü, belirli bir kalite düzeyine getirmektir (Thierry ve diğ, 1995). Makyajlama tesisleri geri dönen ürünü yeni ürün ile hemen hemen aynı kalite standardına getirirler (Jarayaman ve diğ, 2003). Genellikle pahalı ürünlere (askerî ve ticarî uçaklar vb.) bu işlem uygulanır. Ürün yenileştirme işlemlerinde kırılmış parçalar sonra yenisi ile değiştirilir ya da eskimiş parçalar teknolojik olarak daha iyi parça ile değiştirilir (Şengül, 2009).
- **Yeniden üretim:** Yeniden üretimin amacı, kullanılmış ürünü, yeni ürünün kalite seviyesine getirmektir. Kullanılmış ürün tamamıyla demonte edilerek tüm modüller ve parçalar kontrolden geçirilir Aşınmış, eskimiş veya teknolojik olarak modası geçmiş parça ve modüller yenisi ile değiştirilir. Tamir edilebilir parça ve modüller onarılır ve testlerden geçirilir (Thierry ve diğ, 1995). Yeniden üretim fizibilite ve sağladığı yararlar açısından ana geri kazanım seçeneği olarak bilinmektedir (Lu ve Bostel, 2007).
- **Üründen parça alma:** İlk üç seçenek geri kazanım faaliyetlerinde yüksek oranda kullanılmış üründe yeniden kullanma sağlamaktadır. Burada ise yeniden kullanım

oranı çok sınırlıdır. Amaç kullanılmış ürün ya da bileşenden, kullanılabilir sınırlı sayıda parçanın geri alınmasıdır (Thierry ve diğ, 1995).

- **Geri dönüşüm:** Yukarıda bahsedilen ürün geri kazanım seçeneklerinde amaç, kullanılmış ürünlerin ve bileşenlerin fonksiyon ve özelliklerinin mümkün olduğunca korunmasıdır. Geri dönüşümde ürün fonksiyon ve özelliklerini kaybeder. Geri dönüşüm, kullanılmış ürünlerden malzeme elde etme işlemidir (Thierry ve diğ, 1995). Geri dönüşüm işleminde ürünün yapısı korunmaksızın malzeme geri kazanılır (Fleischmann, 2000). Geri dönüşüm çok sayıda kullanılmış ürüne uygulanmaktadır. Örneğin ABD, İngiltere, Almanya gibi birçok ülkede ıskartaya çıkmış araba ağırlığının %75'ini oluşturan neredeyse tüm metal parçaları, geri dönüşüme tabi tutulmaktadır (Thierry ve diğ, 1995).

2.3.4 Elden çıkarma

Bu aşamada teknik ya da ekonomik nedenlerden dolayı yeniden kullanılamayan değersiz ürünler için gerekli olan işlemler yapılır. Bir atık ya da hurdanın değersizliği, onun teknik ya da ekonomik olarak yeniden kullanılmasının herhangi bir değer yaratmaması veya işlemeye değer olmamasından kaynaklanır. Muayene ve ayıklama aşamasında çok fazla tamir gerektirdiği için reddedilen ürünler veya tarihi geçtiği için kullanılamayacak olan ürünler bertaraf edilebilir. Taşıma, toprağa gömme ve yakma gibi seçenekleri mevcuttur (Fleischmann ve diğ, 2000).

2.3.5 Yeniden dağıtım

Yeniden kullanılabilir ürünlerin pazarlara, bazı kullanılabilir kısımlarının da tedarikçilere ya da ileri lojistiğe nakliyesi işlemleridir. Bu aşama geleneksel dağıtım ağına benzer ancak aralarında bazı farklılıklar vardır. Örneğin, geleneksel dağıtımda ürünlerin rotaları önceden bilinmekte iken, tersine lojistikte ürün rotaları muayene ve ayıklama sürecinin sonunda ortaya çıkar. Yeniden dağıtım aşamasında satış, taşıma, depolama ve kiralama işlemlerinden oluşur (Fleischmann, 2000; Kumar ve Malegeant, 2006). Geri dönüştürülmüş ürünleri satışı, yeniden imal edilmiş fotokopi makinelerinin kiralanması bu adımın tipik örnekleridir (Fleischmann ve diğ, 2000).

2.4 Tersine Lojistikte Geri Dönüş Kaynakları

Ürünler artık fonksiyonlarını yerine getiremiyorsa, onlara daha fazla gereksinim duyulmuyorsa geri gönderilir ya da atılırlar. Ürün geri dönüşlerinin en tipik sebeplerini, hatalar, taşıma sırasındaki oluşan hasarlar, yeni model ürünlerin piyasaya sürülmesi, ürünü başka bir ürünle değiştirme, geri iade, tamir, geri çağırımlar ve hatalı teslimat şeklinde sıralamak mümkündür (Min ve diğ, 2006). Bununla birlikte, ürünlerin üretim aşamasında başlayarak müşterilere ulaştırılınca kadar geçen tedarik zinciri hiyerarşisindeki çeşitli geri dönüş nedenleri aşağıdaki gibi üç ana grupta toplanabilir (Dekker ve diğ, 2004):

- Üretim geri dönüşleri
- Dağıtım geri dönüşleri
- Müşteri geri dönüşleri

a) Üretim geri dönüşleri: Bazen üretim sırasında istenen kalitenin yakalanamaması ya da üretim aşamasında, geri kazanılmasını gereken ürün ya da parçaların geri alınması işlemleri üretim geri dönüşlerini oluşturur. Bu durum çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir:

- Hammadde fazlalığı
- Kalite kontrol dönüşleri
- Üretim artıkları

Hammadde fazlalıkları ve üretim artıkları ihtiyaç duyulmayan ürünler olarak vasıflanırken, kalite kontrol dönüşleri kusurlu ürün sınıfına dâhil edilmektedirler (Dekker ve diğ, 2004).

b) Dağıtım geri dönüşleri: Tersine lojistikte dağıtım aşamasında meydana gelen tüm geri dönüşleri kapsamaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir (Dekker ve diğ, 2004):

- Ürün geri çağırımlar
- B2B ticari dönüşleri
- Stok ayarlamaları
- Fonksiyonel dönüşler (dağıtım elemanları, taşıyıcılar)

Ürün geri çağırımlar, müşterilerden ürünlerin geri alınması içeren bir tersine dağıtım aktivitesidir (Jarayaman ve diğ, 2003). Ürünlerde güvenlik ya da sağlık riskleri nedeniyle meydana gelen geri çağırımlar üretici ya da tedarikçi

tarafından başlatılır. B2B ticari dönüşleri, perakendeci ile ana firma arasındaki kontrata bağlı geri iade opsiyonlarından kaynaklanır. Hasarlı ürün teslimatları, hatalı ürünler, kullanım ömrü tükenmiş ürünler, satılamamış sezonluk ürünler vb. bu kategoriye örnek olarak verilebilir. Stok ayarlamaları, zincirde yer alan bir aktörün stoklarını yeniden dağıtması sonucu ortaya çıkar. Bu konuda antrepo ve mağazalar arasında yapılan stok uyarlaması örnek olarak gösterilebilir. Fonksiyonel geri dönüşler, zincirde ileri ya da geri gönderilmelerine neden olan dağıtımda kullanılan konteyner, palet vb. ürünlerle ilgili geri dönüşlerdir. Bu ürün taşıyıcıları temel bir işleme tabi tutulmaksızın tekrar kullanılabilirler (Dekker ve diğ, 2004).

c) Müşterilerden geri dönüşler: Bu geri dönüşler ürünün tüketiciye ulaştıktan sonra çeşitli sebeplerden dolayı geri gönderilmesi ile oluşur.

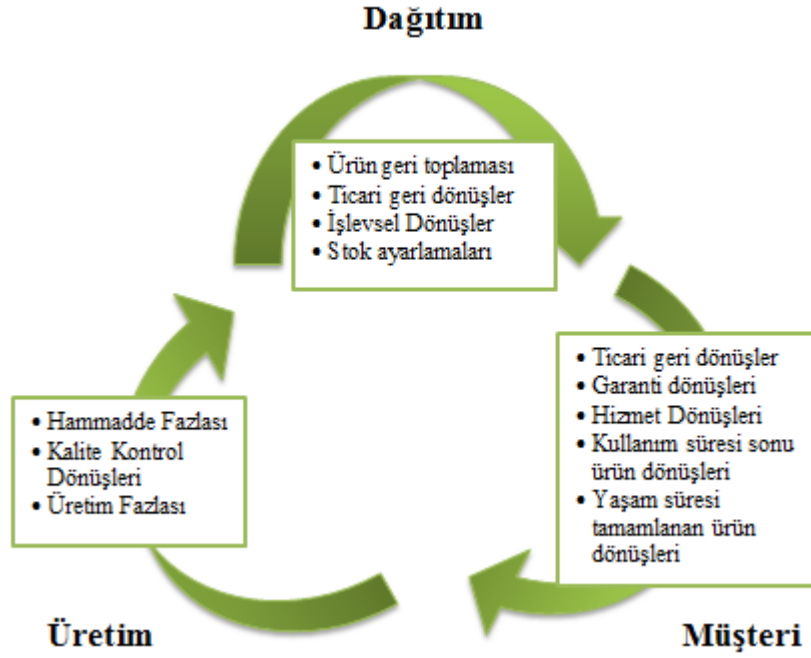
- B2C ticari geri dönüşler (ödeme garantileri)
- Garanti dönüşleri
- Hizmet dönüşleri (tamir, yedek parça)
- Kullanım sonu geri dönüşleri
- Yaşam sonu geri dönüşleri

Müşterilerin para alma ya da benzer bir garanti ile yeni ürünü geri göndermesi B2B ticari geri dönüşler sınıfına girmektedir. Garanti ve hizmet dönüşleri, ürünün taşınması sırasında ya da kullanımı esnasında meydana gelen hatalardan kaynaklanmaktadır. Tamir bu kategorideki ürünler için uygun hazırlama faaliyetidir (Fleischmann, 2000). Müşteriler üretici firma tarafından söz verilmiş olan kalite standartlarının karşılanamaması durumunda garantiden kaynaklanan haklarından yararlanırlar. Garanti kapsamında geri dönen ürünler durumlarına göre ya müşteriye yenisi verilir ya da tamir edilerek müşteriye geri verilir (Dekker ve diğ, 2004). Garanti süresi dışında üründe meydana gelen hatalar için üretici firma garanti kapsamı haricinde müşteriye tamir, bakım vs. hizmetleri sunmaktadır. Bunlarda hizmet geri dönüşleri sınıfına girmektedir.

Kullanım ömrünün sonuna gelmiş ürün geri dönüşleri, kullanımı tamamlandıktan sonra elden çıkartılan ürünleri kapsamaktadır. Büyük olasılıkla en belirgin TL akış kategorisi kullanım ömrünün sonuna gelmiş ürün akışlarından oluşmaktadır (Fleischmann, 2000). Kiralama durumlarında ve şişeler gibi geri gönderilebilen taşıyıcılarda geçerli bir durumdur. Yaşam sonu geri dönüşleri, ürünün ekonomik ya

da fiziksel yaşamının sonunda geçerli olan bir durumdur. Bu durumdaki ürünler yasal geri alma zorunlulukları bulunan OEM 'lere ya da malzemesinden ya da geri dönüştürülmüş halinden yararlanmak isteyen şirketlere gönderilirler (Dekker ve diğ, 2004).

Şekil 2.4'te tedarik zincirinin üç katmanındaki (üretim, dağıtım ve müşteri) geri dönüş nedenleri görülmektedir (Dekker ve diğ., 2004).



Şekil 2.4: Tersine lojistikte geri dönüş nedenleri.

2.5 Ters Lojistikte Karar Aşamaları

Ürünlerin geri kazanımı için ürünlerin kullanıcılardan tesislere taşınması ve buradan da yeniden pazara sunulması için yerleşim yerlerinin tespiti, tesisler ve her bir tesis arasında taşınacak miktarlar alınması gereken önemli kararlardır (Fleischmann ve diğ, 1997). Tersine lojistikte dönemsel kararlar şu şekilde sıralanmaktadır (De Brito, 2004; Srivastava, 2008b):

- **Uzun dönemli kararlar:** Fabrika yerleşimi, tesis planlama, kapasite ve tasarımı
- **Orta dönemli kararlar:** İşlemlerin entegre edilmesi, hangi enformasyon ve teknolojik sistemlerinin kullanılacağı

- **Kısa dönemli kararlar:** Elde bulundurulanan stoklar, araç rotalama, yeniden imalat çizelgelemeleri

Stratejik kararlar üst yönetim, taktik kararlar orta seviye yönetim ve operasyonel kararlar ise alt seviye yönetim tarafından verilmektedir (Şengül, 2009).

2.6 İşletmelerin Tersine Lojistik Uygulama Sebepleri

İşletmelerin tersine lojistik uygulama sebepleri üç genel başlık altında özetlenebilir.

2.6.1 Ekonomik faktörler

Rekabet koşullarının sertleştiği günümüz dünyasında ekonomik unsurlar ürünlerin iyileştirilmesinde tetikleyici rol oynamaktadır. İşletmeler üretim maliyetlerini azaltma yollarını aramaktadırlar. Tersine lojistik programı firmalara hammadde kullanımını azaltarak, geri kazanımla ürüne değer katarak veya imha maliyetlerini azaltarak direkt kazanımlar oluşturabilir. Tersine lojistiğin dolaylı kazançları ise, yeşil (çevresel) imaj, iyileştirilen tüketici memnuniyeti, gelecekte uygulanacak kanunlara hazırlık ve pazar korunumu şeklindedir (Fleischmann, 2000; De Brito, 2004). Yapılan araştırmalar yeniden üretimin yeni ürün üretiminden %25 daha az maliyetli olduğunu göstermektedir (Linton ve Johnston, 2000). Şirketlerin ileride yürürlüğe girecek olan yasalara uyum sağlayabilmek için önceden geri kazanım yapması kendilerine bir avantaj sağlayacaktır (Louwers ve diğ, 1999). Artan çevre sorunlarına karşı daha duyarlı olmaya başlayan müşteriler ile daha iyi ve yakın ilişkiler içinde olmak için ürün geri kazanım etkinliklerini uygulayabilirler. Böylece oluşturulan yeşil imaj ile dolaylı ekonomik kazanç elde ederler (Büyüközkan ve Vardaloğlu, 2008; Fleischmann ve diğ, 2000).

Tersine lojistiğin firmalara sağladığı direkt ve dolaylı faydalar aşağıdaki gibi özetlenebilir (Dekker ve diğ, 2004):

• Direkt Faydalar

- Kullanılan malzemeyi azaltma
- Maliyetleri düşürme
- Geri kazanımla ürüne değer katma

• Dolaylı Faydalar

- Yürürlüğe girecek olan yasalar
- Pazar payını koruma

- Yeşil imajı
- Müşteri/tedarikçi ilişkilerini geliştirme

2.6.2 Yasal düzenlemeler

Firmaları tersine lojistik uygulama iten bir diğer sebep yasal düzenlemelerdir. Yasalar ile firmaların belli orandaki kullanılmış ürünlerini geri toplamaları ve geri kazanmalarını kastedilmektedir (Dekker ve diğ, 2004; De Brito, 2004). Günümüzde geri dönen ürünlere büyük önem verilmekte ve hayat çevrimini tamamlamış ürünler için imalatçılara sorumluluklar yüklenmektedir (Fleischmann ve diğ, 2001). Pek çok ülkede firmalar, ürettikleri ürünlerin belirli bir kısmını geri toplamakla sorumlu tutulmaktadır. Özellikle Avrupa Birliği, çevresel etkilerin azaltılması hatta ortadan kaldırılması için “yeşil yasaların” geliştirilmesi ve uygulanmasına önem vermektedir (Şengül, 2009).

Almanya’da 1991 yılında yürürlüğe giren “Almanya Atık ve Paketleme Yasası” kapsamında, üreticiler, dağıtımıcılar ve perakendeciler paketleme atıklarının en az %60-%75’ini geri dönüştürmek zorundadırlar (Fleischmann ve diğ, 1997). Yine bu ülkede üreticiler yaşam süresi tamamlanmış elektronik ürünlerin elden çıkarılmasından sorumludur (Jarayaman ve diğ, 2003). Türkiye’de ise “Ambalaj ve Ambalaj Atıkları Kontrolü Yönetmeliği” 30.07.2004 tarihinde yürürlüğe girmiştir.

Avrupa Birliğinde, Ocak 2003’te elektrik ve elektronik ürünlerinin atıklarının toplanması ve bu tür ürünlerin geri kazanımının desteklenmesi için “Atık Elektronik ve Elektrik Eşya” (WEEE) yönergesi yayınlamıştır (EC, 2003a). Yine aynı şekilde Avrupa Komisyonu tarafından, “Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılmasına İlişkin Yönerge” (RoHS), (2002/95/EC sayılı yönetmelik) yayımlayarak elektrikli ve elektronik cihazların üretim süreçlerinde altı zararlı maddenin (krom, kadmiyum, kurşun, polibromürlü bifenil, civa ve polibromürlü difenil eter) kullanım miktarları kısıtlanmıştır (EC, 2003b).

Japonya’da kanun gereği devlet tarafından alınan her ürün geri dönüşümü olan malzemeleri içermelidir. Hollanda’da imalatçılar buzdolabı, çamaşır makineleri, dondurucular, televizyonlar ve elektronik araçlar ile tüm bu ürünlerin ambalajları gibi ürünlerin kullanılmış olanlarının toplanması, işleme tabi tutulması ve geri dönüşümünün sağlanmasından sorumludurlar.

Genel olarak bu yasal düzenlemeler, ürünlerin yaşam döngülerinin sonunda toplanması, yeniden kullanımı, atık yönetimi ve bununla ilgili sorumlulukların

üreticilere yüklenmesi, atık miktarının azaltılması, ürün ya da malzeme geri dönüşüm oranlarının artırılması yönünde olmaktadır. Ülkemizdeki yasal düzenlemelerden bazıları şu şekildedir: Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü yönetmeliği, Katı Atıkların Kontrolü yönetmeliği, Bitkisel Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği, Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği, Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği, Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği vs.

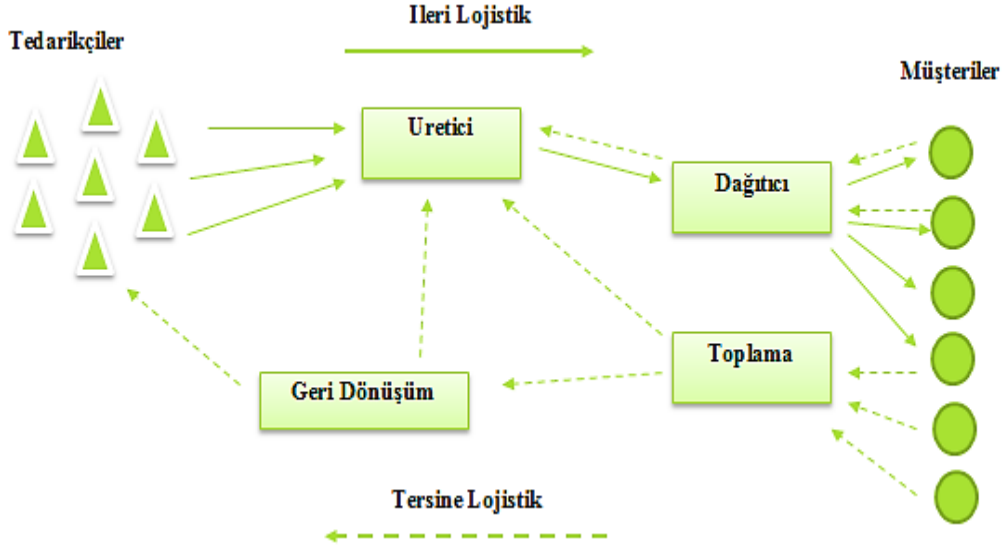
2.6.3 Çevresel duyarlılık

Çevre ile ilgili konulardaki duyarlılık TL ile ilgili uygulama sebeplerinden biridir. Çevresel hedeflerin firmanın TL uygulamalarına ve stratejik planlarına de dâhil edilmesi rakiplerine nispetle firmaya rekabet avantajı sağlamaktadır. Son yıllarda tedarik zinciri yönetiminde çevre yönetimine olan ilgi gittikçe artmaktadır (Ravi ve diğ, 2005). Bunun neticesi olarak çevre dostu ürünler üretmek ve üretilen ürünlerin geri kazanımı önemli bir pazarlama bileşeni haline gelmiştir (Şengül, 2009).

Bunlara ek olarak Ravi ve diğ. (2005) TL'nin diğer bir uygulama sebebi olarak, bir şirket veya organizasyonun tersine lojistik faaliyetleri konusunda sorumlu olmasını gerektiren değerler ile ilgili olan şirket vatandaşlığından bahsetmiştir. TL şirket imajının iyileşmesine fayda sağlar. Bu konuda Nike firması kullanılmış ayakkabıları basketbol sahaları ve koşu parkurlarının yapımında kullanılan malzemeye dönüştürülmektedir. Bu da marka değerini artırmaya yönelik pozitif bir etki yapmaktadır.

2.7 İleri Lojistik ve Tersine Lojistik Arasındaki Farklar

İleri ve tersine lojistik kavramları bazı farklılıklar içermektedir. Bununla beraber tersine dağıtım, ileri dağıtımın simetrik bir yansıması olmayabilir (Fleischmann ve diğ, 1997). Şekil 2.5'te ileri ve tersine lojistik dağıtımları görülmektedir.



Şekil 2.5: İleri ve tersine lojistik dağıtım.

Tersine lojistik ile ileri lojistik arasındaki en temel fark tersine lojistiğin yapısı gereği kullanılmış ürün açısından bir takım belirsizlikler içermektedir. Geri dönen ürünün miktar, kalite ve zamanlaması hakkında belirsizlikler bulunmakta, dahası firmanın ürettiği her ürün için farklı bir dönüş oranı geçerli olmaktadır. İleri lojistikte ise zaman, miktar, kalite gibi faktörler kontrol edilebilir olduğundan tedarik tahmin edilmesi kolaydır. Bu özellik bu iki sistemi ayıran en önemli özelliktir. İleri ve tersine lojistik arasındaki farklılıklar çizelge 2.1’deki gibi özetlenebilir (Tibben-Lembke ve Roger, 2002):

Çizelge 2.1: İleri ve tersine lojistik arasındaki farklılıklar.

İleri Lojistik	Tersine Lojistik
Tahminler nisbi olarak belirgindir	Tahmin yapmak daha zordur
Taşıma bir merkezden çok merkeze doğru	Taşıma çok merkezden bir merkeze doğru
Ürün kalitesi üniform	Ürün kalitesi üniform değil
Ürün paketleme üniform	Ürün paketi zarar görmüş
İzlenecek rota bellidir	İzlenecek rota belli değildir
Kanallar standartlaşmış	Beklentilerle yönlendirilir
Fiyatlar standart	Fiyat birçok faktörden etkilenir
Maliyetler muhasebe sistemi ile kontrol altındadır	Maliyetler daha az belirgindir
Tutarlı stok yönetimi	Tutarsız stok yönetimi
Aktörler arası anlaşmalar açık ve basit	Aktörler arası anlaşmalar şartlara bağlı tamamlanır
Pazarlama yöntemleri belirli	Pazarlama yöntemleri bazı şartlara göre değişir
Ürünü takip için gerçek zamanlı bilgi hazırır	Sürecin izlenebilirliği seviyesi daha düşüktür

2.8 Tersine Lojistik Ağlarının Sınıflandırılması

Tersine lojistik ağ yapıları arasındaki temel farklar aşağıdaki etkenlere göre gerçekleşmektedir (Fleischmann ve diğ, 2000):

Merkezileşme derecesi, benzer faaliyetleri gerçekleştiren bölgelerin sayısı ile ilgilidir. Merkezleştirilmiş bir ağda her faaliyet sadece belirli merkezlerde yapılırken, merkezi olmayan ağlarda aynı işlem birden çok bölgede paralel olarak yapılır. Merkezileşme tersine lojistik ağın yatay entegrasyon seviyesini de ifade etmektedir.

Seviye sayısı, bir ürünün sırasıyla uğradığı tesis sayısıdır. Seviye sayısı ağda dikey entegrasyon seviyesini gösterir. Tek seviyeli bir ağda tüm faaliyetler tek tip bir tesiste yapılır, çok seviyeli bir ağda ise farklı faaliyetler farklı merkezlerde gerçekleştirilir.

Diğer ağlarla olan bağlantı, geçmişte var olan ağlarla entegrasyon derecesine ifade eder. Tersine lojistik ağı bağımsız olabileceği gibi mevcut bir ileri lojistik ağın genişletilmesiyle de oluşturulabilir.

Açık ya da kapalı çevrim olması, içeri doğru akışlarla dışarı doğru akışlar arası ilişkiyi gösterir. Kapalı döngü bir ağda, kaynak ve varış noktaları bir döngü oluştururken, açık döngü ağlarda tek yönlü olan akış bir noktada başlar farklı bir noktada biter.

Bileşenler arası işbirliği seviyesi, aktörlerin ağı oluşturmak için birbirleriyle olan ilişkilerini kapsar. Girişim tek bir şirket tarafından gerçekleştirilebileceği gibi, 3. parti firmalar sürece dâhil edilebilir ya da bir endüstri dalında ortak katılımlı bir yatırım gerçekleştirilebilir.

2.9 Elektrikli-Elektronik Atıkların Geri Dönüşümü

EEE dünyada en hızlı büyüyen pazarlardan biridir (Hischier ve diğ, 2005). Buna bağlı olarak son yıllarda dünya genelinde EEE üretiminde hızlı bir artış görülmektedir. Hızlı teknolojik gelişmeler ve pazara sürekli yeni ürünlerin sunulması modern dünyada bu ekipmanların günlük hayattaki kullanımını artırmakta bu ise aynı oranda yeni çevre sorunlarına da neden olan AEEE sürekli artan oranda açığa çıkmasına sebep olmaktadır (He ve diğ, 2006; Achillas ve diğ, 2012).

EEE, EU's Directive 2002/96/EC yönetmeliğine göre, asıl işlevini yerine getirmek için elektrik akımına veya elektromanyetik alana ihtiyaç duyan ve bu gibi akımı ve alanı üreten, ileten ve ölçen ve de 1000 Volt alternatif akım veya 1500 Volt doğru akım kullanımını geçmeyecek şekilde tasarlanmış ekipmanlardır (Bereketli ve diğ, 2011). AEEE basit bir bakış açısı ile sahibine artık herhangi bir fayda sağlamayan veya kullanım ömrünü tamamlayan, arıza vb. durumlar sonucu atıl hale gelen çeşitli elektrik-elektronik ürünler ve malzemelerin oluşturduğu atıklardır Widmer ve diğ. (2005). EU's Directive 2002/96/EC yönetmeliğine göre AEEE, tüm bileşenleri, alt montajları ve atıldığında mamulün bir parçası olan sarf malzemeleri dâhil olmak üzere atık olarak tanımlanan elektrikli veya elektronik ekipmandır Widmer ve diğ. (2005). AEEE yerine alternatif olarak, e-atık ve e-artık terimleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Chancerel ve Rotter, 2009).

Birleşmiş Milletler Çevre Programı dünyada her yıl 50 milyon ton AEEE üretildiğini hesaplamıştır (Bereketli ve diğ, 2011). Avrupa Birliği Komisyonunun öngörülerine göre Avrupa ülkelerinde 1995-2020 arasında e-atık miktarında %45 artış olması öngörülmektedir (Hischier ve diğ, 2005). 1998'de batı Avrupa'da 6 milyon ton AEEE oluşmuş ve bu miktarın yılda % 3–5 oranında artması beklenmektedir (Cui ve Forssberg, 2003). 2005 yılında Birleşmiş Milletler Üniversitesinin açıklamasına göre 27 Avrupa Birliği üyesi ülkede 8.3–9.1 milyon ton e-atık üretilmiştir. (Oliveira ve diğ, 2012) 2015'de e-atık miktarının yıllık 12 milyon ton olacağı düşünülmektedir. Bu ise kişi başına yıllık 14 kg AEEE 'ya denk gelmektedir (Gutierrez ve diğ, 2008). Amerika Birleşik Devletlerinde 2004 yılında 315 milyon adet bilgisayar son kullanım süresini tamamlamıştır (He ve diğ, 2006).

Çizelge 2.2'de dünyanın bazı ülkelerinde kişi başına üretilen AEEE miktarları görülmektedir (Ongondo ve diğ, 2011):

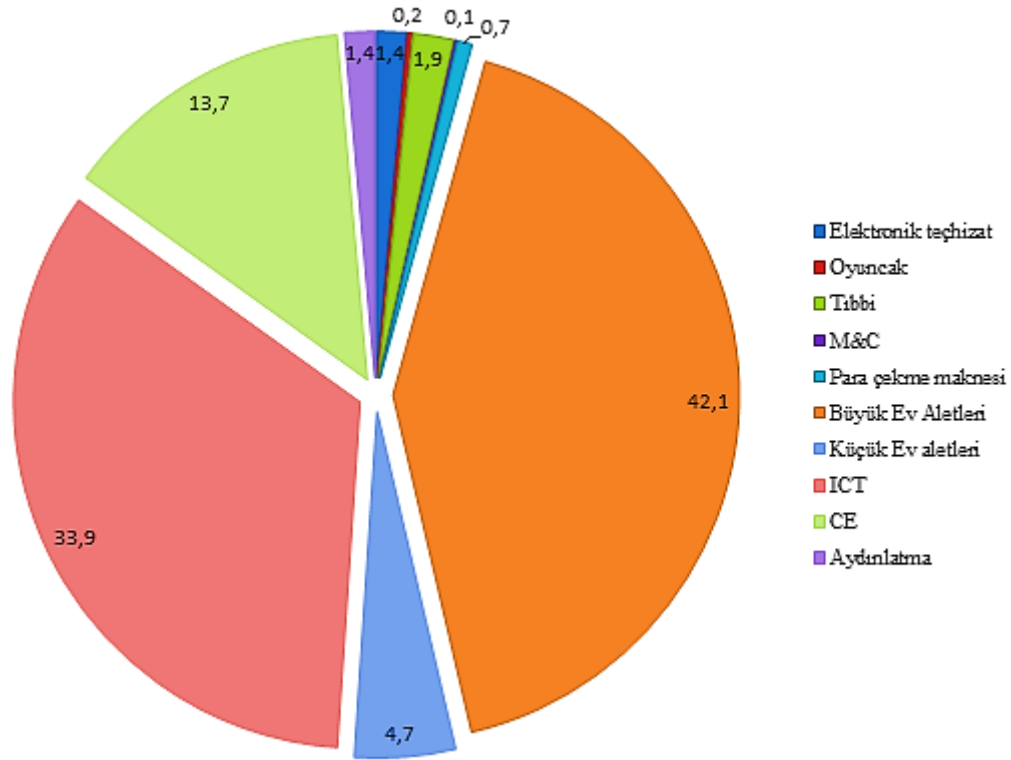
Çizelge 2.2: Bazı ülkelerinde kişi başına üretilen AEEE miktarları.

Ülke	Kişi Başı yıllık AEEE miktarı (kg)
Almanya	13.3
İngiltere	15.8
İsviçre	9
Çin	1.7
Hindistan	0.4
Japonya	6.7
Kenya	0.2
Güney Afrika	1.2
Arjantin	2.5
Brezilya	3.5
Amerika Birleşik Devletleri	7.5
Kanada	2.7

2002/96/EC direktifine göre Avrupa Parlamentosu ve AEEE Konseyi (Ocak 2003) AEEE ürün kategorilerini aşağıdaki şekilde tanımlamıştır (Widmer ve diğ, 2005):

1. Büyük ev eşyaları (Buzdolabı, çamaşır makinesi vb.)
2. Küçük ev aletleri (Elektrik süpürgesi, tost makinesi vb.)
3. Bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları (Bilgisayarlar, telefonlar vb.)
4. Tüketici ekipmanları (Video kameralar, müzik enstrümanları vb.)
5. Aydınlatma ekipmanları (Flüoresan lambalar vb.)
6. Elektrikli ve elektronik aletler (büyük ve sabit sanayi aletleri hariç olmak üzere) (Matkaplar, testereler vb.)
7. Oyuncaklar, eğlence ve spor aletleri (Video oyunları, jetonlu makineler vb.)
8. Tıbbî cihazlar (Diyaliz ekipmanları, analiz ekipmanları vb.)
9. İzleme ve kontrol aletleri (Termostatlar, ısı ayarlayıcıları vb.)
10. Otomatlar (Para, içecek otomatları vb.)

Şekil 2.6’da Batı Avrupa ülkelerinde toplanan AEEE bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Batı Avrupa için AEEE bileşenleri.

AEEE 'nın işlenmesinde üç farklı yol vardır. Bunlar geri kazanım, geri dönüşüm ve bertaraf seçenekleridir. Bu işlemler önceki bölümlerde anlatılmıştır. Yönetmelikler gereğince toplam ürünün %80'i geri dönüştürülmelidir (Gomes ve diğ, 2011).

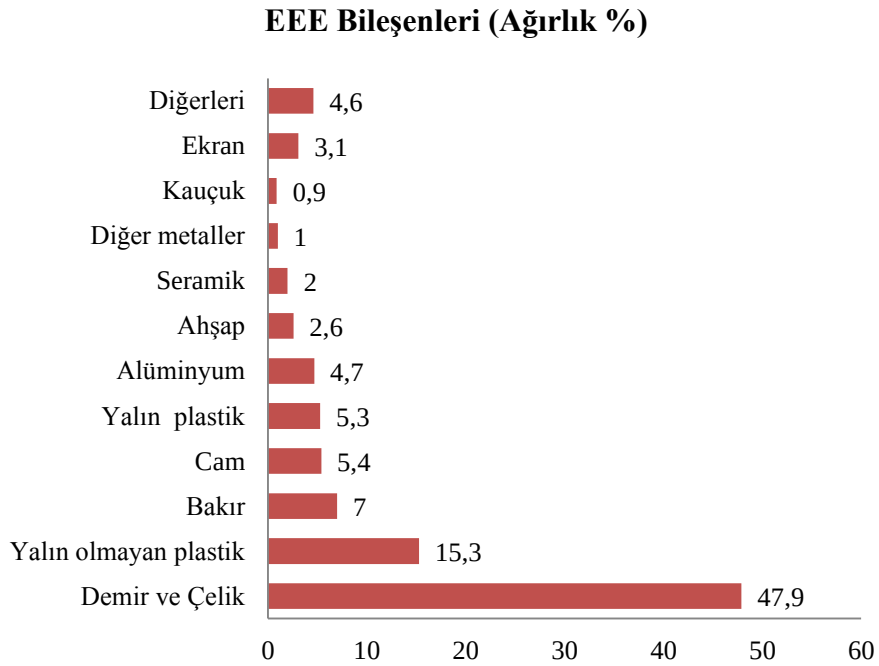
2.9.1 AEEE ürünlerinin karakteristikleri

AEEE malzeme ve bileşen açısından heterojen ve karmaşık yapıdadır. Maliyet etkin ve çevre dostu kalifiye bir geri dönüşüm sistem geliştirmek değerli malzeme, zararlı atık ve atık bileşenlerinin fiziksel özelliklerini bilmekle alakalıdır. Bu özellikler aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir (Cui ve Forssberg, 2003):

- **Zararlı bileşenler:** AEEE bileşen ve malzemeleri açısından homojen olmayan ve kompleks bir yapı içermektedir (He ve diğ, 2006). Bu bileşen ve malzemelerin içerisinde demir, çelik, bakır, alüminyum, metal, altın, gümüş, paladyum, platinyum, plastik vb. değerli malzemeler olduğu gibi insan sağlığı ve çevreye zararlı olan atıklar da bulunmaktadır (Wang ve diğ, 2012). E-atıklar kontrol olmadan geri dönüşüm ya da bertaraf işleminden geçmezlerse insan sağlığı ve çevreye olumsuz etkileri görülebilir. Örneğin tüketici elektronik ürünlerinin içeriğinde, insan beyninde zarar sebep olan, alerjik reaksiyonları ve kanseri tetikleyen %40 oranında kurşun içermektedir (Widmer ve diğ, 2005). AEEE 'daki zararlı maddeler kadmiyum,

bateri, katot ışın tüpleri, elektrik düğmeleri gibi civa içeren bileşenler, asbest atığı, toner kartuşları, likit, macun ve renkli toner, likit kristal görüntüleyiciler ve gaz deşarj lambaları vb. olarak sıralanabilir. (Cui ve Forssberg, 2003; He ve diğ, 2006)

• **Malzeme kompozisyonu:** EEE'lar yapısında binden fazla farklı madde bulunmaktadır. AEEE 'ler yapılarında dikkate değer ölçüde değerli malzemeler bulundurmaktadır (Widmer ve diğ, 2005). Elektronik atık geri kazanımının temel ekonomik tetikleyicisi içerdiği değerli metallerdir. Bununla birlikte, EEE içindeki değerli metallerin oranı gittikçe azalma yönünde bir eğilim göstermektedir (Cui ve Forssberg, 2003). İlk nesil bilgisayarlarda 4gr altın bulunmaktaydı. Bugün bu miktar 1 gr civarındadır. Bir ton AEEE 0.2 ton bakır içermektedir (Widmer ve diğ, 2005). Avrupa Plastik İmalatçıları Birliği'nin 1995 yılında Doğu Avrupa için hazırlamış olduğu bir çalışmada EEE'nin içeriğinde bulunan temel malzemelerin oranları şekil 2.7 ' de verilmiştir (Cui ve Forssberg, 2003).



Şekil 2.7: EEE' de bulunan temel malzemeler.

- **Fiziksel Özellikleri:** Değerli metallerin bir karışımı olarak AEEE, bakır, alüminyum, altın gibi metaller ve plastik kaynağı olarak görülebilir. Mekanik bir geri dönüşüm sistemi geliştirilmesinde anahtar faktör, fiziksel karakteristiklerdeki farklılıklara dayanan etkin bir malzeme ayırım sürecidir (Cui ve Forssberg, 2003).
- **Parça büyüklüğü, şekli ve ayrıştırılabilirliği özellikleri:** Parça büyüklüğü, şekli, mekanik geri dönüştürülebilirlik özellikleri, mekanik geri dönüşüm süreçlerinde önemli bir rol oynarlar. Hemen hemen tüm mekanik geri dönüşüm süreçlerinin etkin olduğu belirli bir parça büyüklüğü aralığı vardır (Cui ve Forssberg, 2003).

2.9.2 E-atıkların (AEEE) yönetmelik bakımından incelenmesi

Birçok ülke geri dönüşümü desteklemek ve bertarafı azaltmak için bu konuda yönetmelikler hazırlamaktadır (Bereketli ve diğ, 2011) Elektrikli ve elektronik atık eşyalarla ilgili olarak Avrupa Birliği'nde (EU) 13 Şubat 2003 tarihinde yürürlüğe giren AEEE (EC,2003a) ve RoHS (EC,2003b) olmak üzere iki ayrı direktif bulunmaktadır (Allsopp ve diğ, 2006). 1 Ocak 2006'dan itibaren Avrupa Birliği sınırları içerisinde üretilecek yada satışa sunulacak elektrikli ve elektronik ürünlerinin, RoHS ve WEEE yönetmeliğine uyumluluğunun zorunlu hale getirilmiştir.

2.9.2.1 RoHS

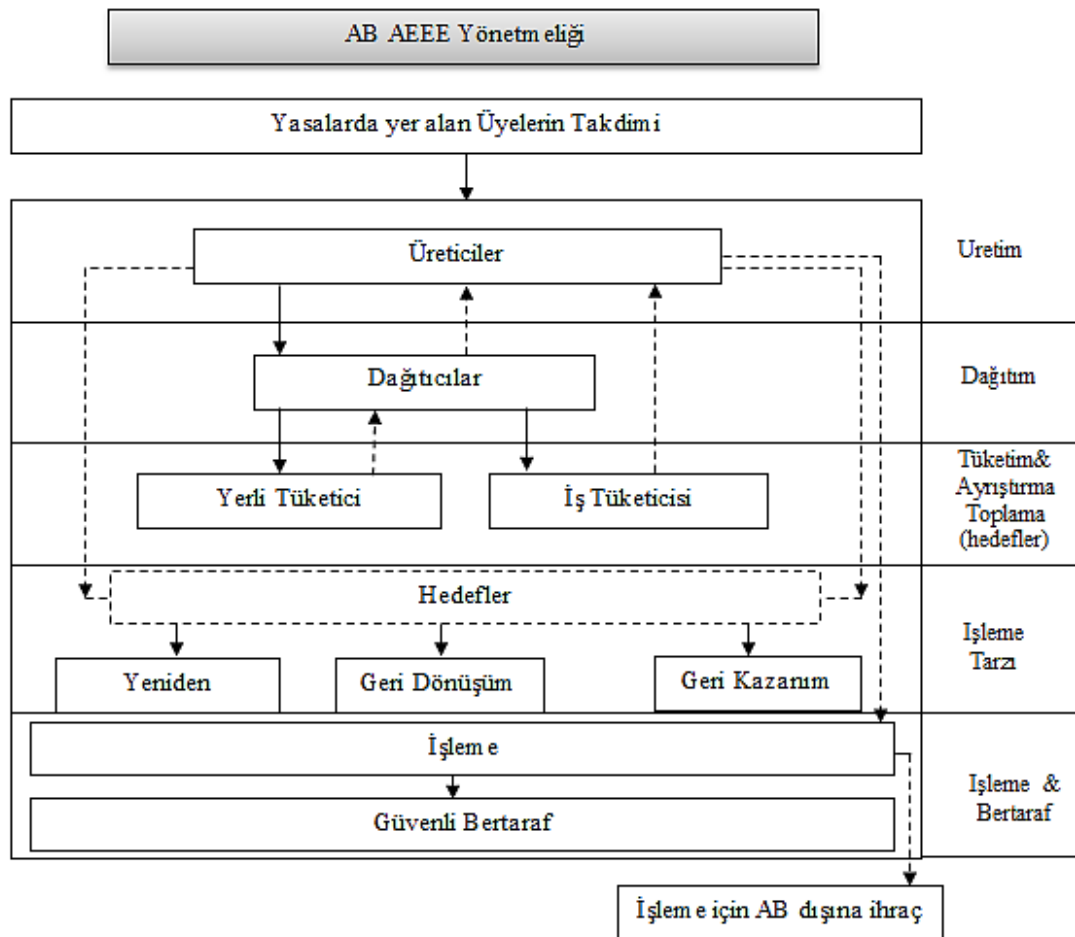
RoHS, Avrupa Birliği tarafından dikte edilen; elektronik cihaz üretiminin çevreye zarar vermemesi için, sağlığa zararlı maddelerin elektrikli ve elektronik ürünlerdeki kullanım miktarlarını kısıtlayan kurallardır. RoHS kapsamında kullanımı sınırlanan 6 madde kadmiyum, civa, krom, polibrominli bifenil, polibrominli difenil eter ve kurşundur (He ve diğ, 2006). Çizelge 2.3'te RoHS kapsamında kullanımı sınırlandırılan madde oranları görülmektedir.

Çizelge 2.3: RoHS kapsamında kullanımı sınırlandırılan maddeler.

Madde	Miktar (Homojen bir malzemede ağırlık olarak)
Civa (Hg)	% 0,1
Artı altı değerlikli krom (Cr6+)	% 0,1
Polibromürlü bifenil (PBB)	% 0,1
Polibromürlü difenil eterin (PBDE)	% 0,1
Kurşun (Pb)	% 0,1
Kadmiyum (Cd)	% 0,01

2.9.2.2 AEEE

AEEE yönetmeliği (Directive 2002/96/EC) Avrupa Birliği içindeki üretici ve ithalatçıların ürünlerini müşterilerden geri toplamaları ve çevreye zarar vermeyecek şekilde bertaraf etmelerini sağlamaktadır (Ongondo ve diğ, 2011). Bu yönetmelik üretici, dağıtıcı, tüketici ve AEEE işleme sürecindeki tüm aktörleri içerir. Tüketiciler toplama, işleme, geri dönüşüm ve bertaraf işlemlerini finanse etmekle yükümlüdürler. Yönetmelik %50 ‘den %80 ‘e varan oranlarda AEEE ürün grubuna bağlı olarak farklı geri dönüşüm oranlarını öngörmektedir. AEEE yönetmeliği EEE bertaraf oranını azaltıp EEE ürünlerinin çevresel performanslarını iyileştirmeyi amaçlamaktadır (He ve diğ, 2006). AEEE ürünlerinin geri kazanım opsiyonları geri kazanım oranının artırılıp bertarafının azaltılması amaçlanmaktadır. Şekil 2.8’de AEEE Yönetmeliğinin basit bir görünümüdür (Ongondo ve diğ, 2011).

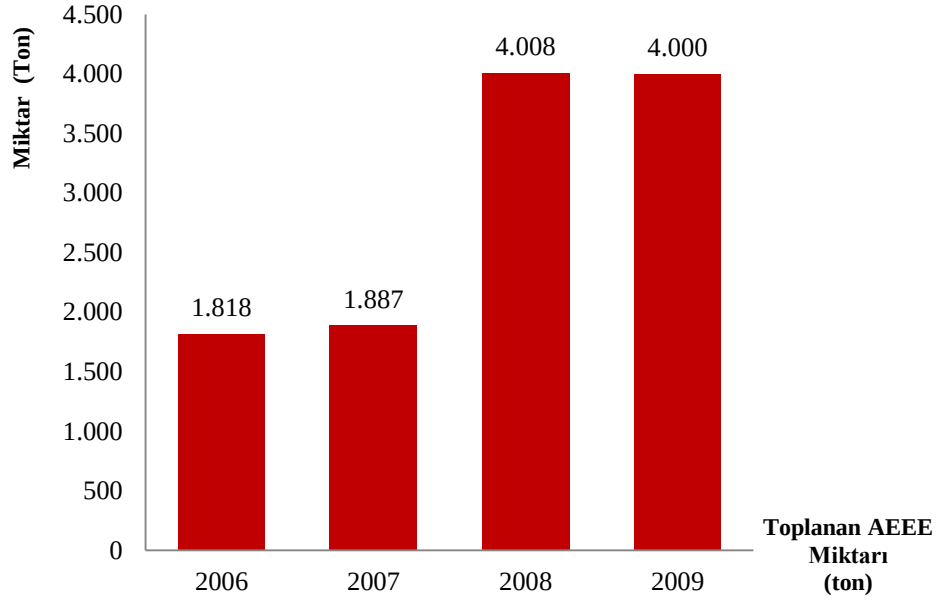


Şekil 2.8: AB AEEE yönetmeliğinin genel görünümü.

2.9.3 E-atık yönetiminde Türkiye ‘deki durum

Türkiye'nin elektrikli ve elektronik atıkların yönetimiyle ilgili gerçekleştirilen ilk çalışma 2004 yılında Matra Projesi kapsamında Hollanda Hükümeti ile yapılmıştır. Bakanlık daha sonra, EEE’ de bazı zararlı maddelerin sınırlandırılmasına dair taslak yönetmelik (RoHS) çalışmaları ilgili sektör temsilcileri ile birlikte, taslak yönetmeliğin son halini hazırlamıştır. 30.05.2009 tarihli 26891 sayılı Resmi Gazete’de “Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılmasına Dair Yönetmelik” yayımlanmış ve 2009’da yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmeliğin amacı; çevre ve insan sağlığının korunması amacıyla; elektrikli ve elektronik eşyalarda bazı zararlı maddelerin kullanımının sınırlandırılması, bu sınırlandırmalardan muaf tutulacak uygulamaların belirlenmesi, elektrikli ve elektronik eşyaların ithalatının kontrol altına alınmasına dair idari, hukuki ve teknik esasları düzenleyerek elektrikli ve elektronik eşya atıklarının çevreyle uyumlu şekilde geri kazanılması ve bertaraf edilmesine ilişkin usul ve esasları düzenlemektir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2008).

“Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği” ise T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 22 Mayıs 2012 tarihli, 28300 sayılı Resmi Gazete’de çıkan yazı ile yürürlüğe konulmuştur (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012). Yönetmeliğin amacı; elektrikli ve elektronik eşyaların üretiminden nihai bertarafına kadar çevre ve insan sağlığının korunması amacıyla elektrikli ve elektronik eşyalarda bazı zararlı maddelerin kullanımının sınırlandırılması, bu sınırlandırmalardan muaf tutulacak uygulamaların belirlenmesi, elektrikli ve elektronik eşyaların ithalatının kontrol altına alınması, elektrikli ve elektronik atıkların oluşumunun ve bertaraf edilecek atık miktarının azaltılması için yeniden kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım yöntem ve hedeflerine ilişkin hukuki ve teknik esasları düzenlemektir. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığınca uygunluk yazısı verilen firmalar tarafından 2006 yılında kayıt altına alınan AEEE toplama miktarı 1.818 ton iken 2009 yılı sonu itibariyle bu rakam 4.000 tona ulaşmıştır. Yıllar itibariyle toplanan AEEE miktarı şekil 2.9’da verilmektedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2011).



Şekil 2.9: Atık elektrikli ve elektronik eşya toplama miktarları (2006-2009).

Toplanan 4.000 ton elektronik atığın işlenmesi sonucu 2.545 ton malzeme yurt içinde kullanılmak üzere satışa sunulurken, yurt içinde kullanım olanağı olmayan 1.146 ton elektronik devre, elektronik komponent vb. ekipmanlar yurt dışına ihraç edilmiştir. Buna rağmen resmi olmayan AEEE toplama süreçlerinden dolayı resmi olarak toplanan AEEE miktarı son derece düşük seviyededir. Elektronik atıkların işlenmesi sonucunda ortaya çıkan ve mevcut durumda Türkiye’de geri dönüşümü mümkün olmayan flüoresan, kartuş-toner, kondansatörler vb. atıklar lisanslı tesislerde bertaraf edilmektedir. 2009 yılında bertarafa gönderilen AEEE miktarı 122 tondur (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2011).

Ülkemizde T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından Bölgesel Çevre Merkezi (REC) adlı özel bir kuruluşa yaptırılan AEEE için Düzenleyici Etki Analizi (RIA) neticesinde ülkemizde 2011 yılı için il bazında kişi başına üretilen AEEE miktarları şekil 2.10’daki gibi hesaplanmıştır. Buna göre İstanbul’da kişi başı AEEE üretimi 10.91 kg iken, Bitlis, Hakkâri, Muş ve Van bölgelerinde bu miktar kişi başı 2.48 kg olarak hesaplanmıştır (REC, 2011).



Şekil 2.10: Türkiye’de iller bazında kişi başına üretilen AEEE miktarları.

E-atık yönetmeliği taslağına göre üreticiler, aşağıda verilen hedeflere uyarak, 2018 yılına kadar en az 4 kg/(kişi*yıl) evsel AEEE’nin toplanmasını sağlayacaktır. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığının yıllara göre evsel AEEE toplama hedefleri çizelge 2.4’te gösterilmektedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012).

Çizelge 2.4: AEEE kişi başına hedeflenen yıllık e-atık toplama miktarları.

EEE Kategorileri	Yıllara Göre Toplama Hedefi (kg/kişi-yıl)				
	2013	2014	2015	2016	2018
1. Buzdolabı/Soğutucular/İklimlendirme cihazları	0,05	0,09	0,17	0,34	0,68
2. Büyük beyaz eşyalar (Buzdolabı/soğutucular/iklimlendirme cihazları hariç)	0,1	0,15	0,32	0,64	1,3
3. Televizyon ve monitörler	0,06	0,10	0,22	0,44	0,86
4. Bilişim ve telekomünikasyon ve tüketici ekipmanları (Televizyon ve monitörler hariç)	0,05	0,08	0,16	0,32	0,64
5. Aydınlatma ekipmanları	0,01	0,02	0,02	0,04	0,08
6. Küçük ev aletleri, elektrikli ve elektronik aletler, oyuncaklar, spor ve eğlence ekipmanları, izleme ve kontrol aletleri	0,03	0,06	0,11	0,22	0,44
TOPLAM EVSEL AEEE (kg/kişi-yıl)	0,3	0,5	1	2	4

Yine aynı yönetmelik taslağına göre e-atıkların geri dönüşüm hedefleri çizelge 2.5 ‘te gösterilmektedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012).

Çizelge 2.5: AEEE geri dönüşüm oranı hedefleri.

Elektrikli ve Elektronik Eşya Kategorileri	Yıllar Ağırlıkça (%) olarak	
	2013	2018
Büyük ev eşyaları (%)	65	75
Küçük ev aletleri (%)	40	50
Bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları (%)	50	65
Tüketici ekipmanları (%)	50	65
Işıklandırma cihaz ve aletleri (%)	20	50
Gaz deşarj lambaları	55	80
Elektrikli ve elektronik aletler (%)	40	50
Oyuncaklar, eğlence, spor aletleri (%)	40	50
Tıbbi cihazlar (%)	---	---
İzleme ve kontrol cihaz ve aletleri (%)	40	50
Otomatlar (%)	65	75

Yine aynı yönetmelik taslağına göre e-atıkların geri kazanım hedefleri çizelge 2.6'daki gibidir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012).

Çizelge 2.6: AEEE geri kazanım oranı hedefleri.

Elektrikli ve Elektronik Eşya Kategorileri	Yıllar Ağırlıkça (%) olarak	
	2013	2018
Büyük ev eşyaları (%)	75	80
Küçük ev aletleri (%)	55	70
Bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları (%)	60	75
Tüketici ekipmanları (%)	60	75
Işıklandırma cihaz ve aletleri (%)	50	70
Gaz deşarj lambaları	70	80
Elektrikli ve elektronik aletler (%)	50	70
Oyuncaklar, eğlence, spor aletleri (%)	50	70
Tıbbi cihazlar (%)	---	---
İzleme ve kontrol aletleri (%)	50	70
Otomatlar (%)	70	80

Ülkemizde özellikle batıda yer alan özellikle Kocaeli ve Sakarya Belediyeleri AEEE toplama işinde öncülük etmektedirler. İstanbul Büyük Şehir Belediyesi ve Kadıköy Belediyesi, Afyon, Bursa, Muğla belediyeleri gibi bazı belediyeler kendi toplama sistemlerini kurmuşlardır (REC, 2011). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'ndan uygunluk belgesi alan tesisler şu şekildedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012):

1. Anel Doğa Entegre Geri Dönüşüm Endüstri A.Ş.
2. Exitcom Recycling for Future
3. Evciler Madencilik ve Değerli Metaller San. ve Tic. Ltd. Şti.
4. Uğur Metal İnş. Mad. Nak. San. Tic. Ltd. Şti.
5. Arte Elektrik Elektronik San. İç ve Dış Tic.Ltd. Şti
6. Asa Metal Dış Tic.Ltd. Şti.
7. Karaman Kardeşler Metal San.ve Tic. Ltd. Şti
8. Sarmet San. Metal Plast. Kağıt İnş. San. Tic. Ltd. Şti.

9. Akademi Çevre Danışmanlık Hizmetleri İnşaat Sanayi ve Tic. Ltd. Şti.
10. Er Metal Madencilik Sanayi Ve Tic. Ltd. Şti.
11. EAG Geri Dönüşüm San. Ve Tic. A.Ş.
12. Redeem Elektronik Cihazlar San. Tic. A.Ş.
13. Bayatlı Geri Dönüşümcülük Demir Çelik Metal San. Tic. Ltd.
14. Aselser Elektronik San. ve Tic. Ltd. Şti.
15. Tekno Geri Dönüşüm Hurda Elektrik Elektronik San. ve Dış Tic. Ltd. Şti.
16. Altaş Yapı Hizmetleri Tic. A.Ş.
17. Öznak Geri Dönüşümlü Atık Değ. San. Tic. Ltd. Şti.

2.10 Tersine Lojistikte Problem Araştırma Alanları

İşletmelerin tersine lojistik faaliyetlerini kendi bünyelerinde uygulayabilmeleri için var olan sistemlerinde, süreçlerinde ve karar alma aşamalarında bir takım yeni düzenlemeler yapmaları gerekmektedir. Düzenleme gerektiren bu alanların tümü, başlı başına çözülmesi gereken problemler olarak da işletmelerin karşısına çıkmaktadır. Brito ve diğ. (2002) tarafından hazırlanan bir çalışmada tersine lojistik konusu ile ilgili altmışın üzerinde vaka çalışması incelenmiş ve bir sınıflandırma yapılmıştır. Buna göre tersine lojistik konusu ağ yapıları, ilişkiler, envanter yönetimi, geri dönüşüm faaliyetlerinin planlanması ve kontrolü ile bilişim sistemleri ile ilgili vaka çalışmaları altında incelenmiştir. Bu bilgilerin ışığında tersine lojistik problem alanları şu şekilde sıralanabilir (De Brito ve diğ, 2002; Karaçay, 2005; Sasikumar ve Kannan, 2008):

- Geri Kazanımlı Üretim Ortamında Stok Kontrolü
- Geri Kazanımlı Üretim Ortamında Üretim Planlama
- Tersine Lojistikte Ortaklarla İlişkiler
- Tersine Lojistik ve E-ticaret
- Tersine Lojistik için Bilgi ve İletişim Teknolojileri
- Tersine Lojistik Ağ Tasarımı

2.11 Tersine Lojistik Ağı Tasarımı

Tersine lojistik ağı tasarım ve yönetimi ileri lojistik ağı tasarımına göre daha karmaşık bir yapıdadır. Bu karmaşıklık iki faktörden kaynaklanmaktadır (Jayaraman ve diğ, 1999):

- a. Aynı anda var olan ve karşılıklı etkileşim içinde olan ileri ve geri akışa sahip olması.
- b. Dönen ürün miktar, kalite ve zamanı açısından belirsizliklerin olması.

Ürün tipi ve geri kazanım seçeneği dikkate alındığında, genel olarak dört farklı tersine lojistik ağından söz edilebilir (Demirel ve Gökçen, 2008a):

1- Doğrudan yeniden kullanım ağları: Paletler, şişeler ve standart konteynerler vb. geri dönen ürünlerden tamir veya yeniden işleme gerektirmeyenler, yeni ürün üretmek için veya taşıma ekipmanı olarak doğrudan yeniden kullanılırlar. Sadece çok küçük muayene, temizleme ve bakım gerekebilir. Doğrudan kullanılan ürünler, yeni ürüne göre daha düşük kalitede olsa da bu durum genellikle ürün performansını etkilemez. Bu ağlar kapalı döngüdür.

2- Yeniden üretim ağları: Bu ağların amacı geri dönen bileşenleri yeni duruma getirerek üretilecek yeni ürünlerde kullanmak ve dönen ürünleri de aynı şekilde yeni konumuna getirmektir. Dönen ürünler, kullanılmış, hayat çevrim süresini tamamlamış veya geri olabilir. Yeniden imal edilmiş 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.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Genel olarak ağ tasarım modelleri deterministik ve stokastik modeller olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Deterministik modeller tersine lojistik ve kapalı döngü ağlardaki belirsizlikleri ihmal ederken, stokastik modeller tersine lojistik ve kapalı döngü ağ tasarımındaki belirsizlikleri dikkate almaktadırlar (İlgin ve Gupta, 2010).

3.1 Deterministik Modeller

Tersine lojistik ağ tasarımında kullanılan deterministik model olarak en çok tercih edilen teknik karışık tamsayılı doğrusal programlamadır (İlgin ve Gupta, 2010). Aşağıda tersine lojistik ağ tasarım literatürü ile ilgili örnek çalışmalar aktarılmaktadır.

Spengler ve diğ. (1997) demir çelik sektörü için iki aşamalı, çok ürünlü, kapasite kısıtlı, açık döngü geri dönüşüm ağ tasarımı için bir karışık tam sayılı doğrusal programlama (KTDP) modeli geliştirmiştir. Barros ve diğ. (1998) Hollanda'da kum geri dönüşümü için çok aşamalı, kapasite kısıtlı tesis yerleşim problemini ele almışlardır. Çalışmada talep belirsizliği altında KTDP modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin karar değişkenleri depo ve kum temizleme tesislerinin sayısı, konum ve kapasitelerinin belirlenmesidir. Modelin çözümü için de sezgisel bir yöntem kullanılmıştır. Krikke ve diğ. (1999) Hollanda bulunan fotokopi makinesi üreticisi bir firmanın iki aşamalı, kapasite kısıtsız, tek ürün, açık döngü tersine lojistik ağ tasarımı için KTDP modeli geliştirilmiştir. Jarayaman ve diğ. (1999) Amerika'da elektronik ekipmanların yeniden imalatını yapan bir firmanın ağ tasarımını ele almıştır. Çalışmada talep ve arz belirsizlikleri altında kapasite kısıtlı, çok ürünlü, çok aşamalı KTDP modeli önerilmiştir. Louwers ve diğ. (1999) atık halıların toplanması, yeniden işleme ve yeniden dağıtımı için tesis yer seçimi ve atama modeli önermişlerdir. Geliştirilen modelin arz yönlendirmeli yani her arz edilenin işlenmek zorunda olduğu yeniden kullanım ağı için Avrupa'da ve talep yönlendirmeli yani atık halıların toplanıp yeniden işlendiği yeniden kullanım ağı için Amerika'da uygulamaları yapılmıştır.

Fleischmann ve diğ. (2001) çalışmasında TDP tabanlı genel geri kazanım ağ modeli geliştirmiştir. Önerilen model fotokopi makinesi ve kâğıt geri dönüşüm süreçleri için uygulanmıştır. Krikke ve diğ. (2001) çalışmada modüler, tamir edilebilir, geri dönüştürülebilir bir ürün yapısı için kantitatif bir model geliştirmiştir. Çevresel etkiler enerji ve atıkla ilgili olarak ölçülmüştür. Geliştirilen model Japon tüketici elektronik firmasına uygulanmıştır. Model merkezi ve merkezi olmayan lojistik, alternatif ürün tasarımları, farklı geri dönen miktar ve kalite ile üreticinin yerine getirmesi gereken potansiyel çevresel yönetmelikler gibi farklı senaryolar kullanılarak çalıştırılmıştır. Shih (2001) çalışmasında tersine lojistik ağ akışı optimizasyonu için geri dönüş oranı ve operasyonel maliyetler belirsizlikleri altında kapasite kısıtlı karışık tamsayılı programlama (KTP) modeli önermiştir. Çalışma kapsamında belirsizlikler senaryolarla ifade edilmiştir. Önerilen model, taşıma, operasyon, yeni tesisler için sabit maliyetler, yerleşim maliyetleri vb. içeren toplam maliyetleri minimize etmeyi hedeflemektedir. Geliştirilen modelin Taiwan 'da bilgisayar ve elektrikli ev aletleri sektörü için uygulaması yapılmıştır.

Hu ve diğ. (2002) çalışmasında çok aşamalı, çok periyotlu, çok ürünlü tehlikeli atık tersine lojistik sistemi için maliyet minimizasyon modeli sunmaktadır. İş stratejileri ve kanuni yönetmelikler gibi iç ve dış faktörler dikkate alınarak maliyeti minimize edecek kesikli zamanlı doğrusal analitik bir model geliştirilmiştir.

Jarayaman ve diğ. (2003), iki aşamalı, tesis sayısı ve kapasite kısıtlı tersine dağıtım problemi için TDP modeli geliştirmiştir. Çalışmada tersine dağıtım problemi için zayıf ve güçlü matematiksel programlama formülasyonları geliştirilmiştir. Önerilen modelin karmaşık bir yapıda olmasından dolayı çözümde yeni bir sezgisel bir yöntem kullanılmıştır.

Beamon ve Fernandes (2004) iki aşamalı, kapasite kısıtlı, tek ürünlü, kapalı döngü bir geri kazanım ağ tasarımı için çok periyotlu karışık tamsayılı programlama modeli önermişlerdir. Operasyonel maliyet ve geri dönüş oranı belirsiz olduğu için senaryolar geliştirilmiştir.

Min ve diğ. (2006) ürün geri dönüşleri için iki aşamalı, kapasite kısıtlı TLAT problemini ele almışlardır. Çalışmada toplama noktalarının yer ve sayılarını tespit eden doğrusal olmayan KTDP modeli geliştirilmiştir. Modelin çözümü için genetik algoritma sezgiseli geliştirilmiştir. Salema ve diğ. (2006) çalışmalarında ilk olarak

ileri ve tersine akışı aynı anda ele alan kapalı döngü, kapasite kısıtsız, tek ürünlü lojistik ağ tasarımı için bir KTDP formülasyonu önermişlerdir. Daha sonra bu model genişletilip çok ürünlü ve kapasite kısıtlı geri kazanım ağı haline getirilmiştir.

Lu ve Bostel (2007) iki aşamalı, tek ürünlü, kapasite kısıtsız ve kapalı döngü 0-1 tamsayılı programlama modeli önerilmişlerdir. Modelin amacı, sabit kurulum ve değişken taşıma maliyetlerinin toplamını minimize etmektir. Modelin değişkenleri ise taşıma miktarları ve merkezlerin açılıp açılmaması şeklindedir. Problemin çözümünde Lagrange Sezgiseli kullanılmıştır. Lieckens ve Vandaele (2007) çalışmalarında siparişi yerine getirme süresi ve envanter pozisyonu gibi dinamik etkenler ve tersine lojistiğin doğasında olan belirsizlikleri dikkate alabilmek için geleneksel yapıdaki modellere kuyruk modelinin eklenmesiyle genişletilmiş yapıda bir model tasarlamıştır. Çalışmada tek aşamalı, tek ürünlü, kapasite kısıtlı ve açık çevrim TLAT için karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama (KTDOP) modeli geliştirilmiştir. Önerilen modelin çözüm sürecinde genetik algoritma tabanlı diferansiyel evrim tekniği kullanılmıştır.

Srivastava (2008a) ve Srivastava (2008b), TLAT için çok periyotlu, iki aşamalı bir optimizasyon modeli sunmuştur. İlk KTDP modeli taşıma ve tesislerin kurulum ve işleme maliyetleri toplamını minimum yapmayı amaçlamakta ve toplama merkezlerinin açılma kararını vermektedir. Farklı periyotlarda yeniden işleme için elden çıkarma kararları, yer ve kapasite kararları eklenerek ve toplama merkezlerinden bu noktalara olan akış ile beraber, ikinci KTDP modeli kar maksimizasyonu amaçlı olarak gerekli kararları vermektedir. Min ve Ko (2008), çalışmalarında tersine lojistikte üçüncü parti lojistik firmalarının tamir tesislerinin optimal yerleşim yerlerinin, sayılarının ve büyüklüklerinin belirlenmesi problemini limitli kapasite ve servis gereksinimi kısıtları altında çözebilmek için bir karışık tamsayılı programlama modeli geliştirmiştir. Önerilen model iki aşamalı, çoklu ürünlü, kapasite kısıtlı ve kapalı çevrimli bir yapıdadır. Modelin çözümü için genetik algoritma kullanılmıştır. Du ve Evans (2008), çalışmalarında üçüncü parti lojistik sağlayıcı bir firmanın kapalı döngü ağ tasarımı için iki amaçlı karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada birinci amaç toplam maliyetlerin minimizasyonu, ikinci amaç ise müşteri hizmet seviyesi ile ilgili olarak toplam döngü süresindeki gecikmelerin minimizasyonu olarak belirlenmiştir. Modelin çözümünde yeni bir sezgisel algoritma kullanılmıştır. Pati ve diğ. (2008),

alışmalarında kâğıt geri dönüşüm lojistik sistemi için çok amaçlı, çok ürünli, çok kademeli, kapasite kısıtlı bir karışık tamsayılı hedef programlama modeli önermişlerdir. Geliştirilen model tersine lojistik maliyetlerini azaltmak, kaynak noktalarında ayrıştırma yoluyla ürün kalitesini artırmak ve atık kâğıtların geri dönüşümü yoluyla çevresel faydalar sağlanmayı amaçlamaktadır. Ürün kalitesini artırma amacı amaç fonksiyonunda uygun olmayan atık kâğıt hedefinin maksimum limitinden pozitif sapmanın minimizasyonu olarak ifade edilmektedir. Çevresel faydalar sağlama amacı ise arzu edilen minimum atık toplamadan negatif sapmanın minimizasyonu olarak ifade edilmiştir. Demirel ve Gökçen (2008) ileri ve geri akışı içeren yeniden imalat sistemi için çok ürün, çok aşamalı yeni bir KTDP modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen model üretim, yeniden üretim ve tesisler arası ürün taşıma miktarı ile beraber ayrıştırma, toplama ve dağıtım tesislerinin optimal yerlerini belirlemektedir. Çalışmada ayrıca farklı geri dönüş senaryoları üretilerek her bir senaryonun performanslarının karşılaştırılması yapılmış ve böylece planlamacılara daha iyi karar almalarında yardımcı olmak hedeflenmiştir. Lee ve Dong (2008), kiralama ve kullanım süresini tamamlamış bilgisayar ürünlerinin geri kazanımı için ileri ve tersine akışı optimize etmeye çalışan, tek ürün, kapasite kısıtlı bir KTDP modeli geliştirmişlerdir. Modelin çözümü için iki aşamalı bir sezgisel bir yöntem geliştiren yazarlar, sayısal analizlerle önerilen yöntemin geçerliliğini analiz etmişlerdir. Yongsheng ve Shouyang (2008) çalışmalarında ürün tamir ve yeniden imalat seçeneklerini aynı anda içeren yeni bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen model Thierry ve diğ. (1995) tarafından sunulan vaka çalışmasını temel alarak, bunun üzerine geri kazanım opsiyonlarından tamir ve yeniden imalatı aynı anda dikkate almaktadır. Bu amaçla tek ürün, çok aşama, kapasite kısıtsız ve kapalı döngü bir KTDP modeli geliştirilmiş ve deneysel veriler kullanılarak önerilen model standart dal sınır algoritması tekniğı ile çözülmüştür. Gülsün ve diğ. (2008) çalışmalarında tersine lojistik ağı tasarımı için Min ve diğ. (2006) yılında geliştirilen iki aşamalı, kapasite kısıtlı doğrusal olmayan KTDOP modelini ele almışlardır. Tersine lojistik ağlarında önemli kararlar olan uygun miktar ve merkezî geri dönüş merkezleri için uygun yerlerin belirlenmesi ve toplama periyodunun gün cinsinden uzunluğu belirlemek için geliştirilen KTDOP modelinin çözümünde tavlama benzetimi (TB) kullanarak yeni bir yaklaşım önerilmişlerdir. Modelin ve çözüm yönteminin açıklanması için sayısal örnek verilmiştir. Çalışma, tavlama benzetimi algoritmasının tersine lojistik ağı tasarımında kullanılan ilk çalışmadır.

Shi ve diğ. (2009) tıbbi atık tersine lojistik ağı için maliyet minimizasyonu amaçlı, çok ürünlü, kapasite kısıtlı bir KTDP modeli geliştirmişlerdir. Önerilen modelin çözümünde genetik algoritma sezgiseli kullanılmıştır. Mutha ve Pokharel (2009) tersine lojistik ağ maliyetinin minimizasyonu amaçlı, tek ürünlü, kapasite kısıtlı ve çok aşamalı bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada bayilerde toplanan kullanılmış ürün miktarları için farklı senaryo oluşturulmuş ve herbir durum için ağın maliyet analizleri yapılmıştır. Rivera ve Ertel (2009) çalışmalarında Meksika’da yaşam süresi tamamlanmış otomobillerin geri dönüşümü için bir tersine lojistik ağ tasarımı yapmışlardır. Önerilen model maliyeti minimize etmeyi hedefleyen kapasite kısıtsız, tek ürün ve tek amaçlıdır. Üretilen otomobillerin müşterilerden geri dönme oranlarına göre üç farklı senaryo altında model çalıştırılmıştır. Problemin çözümünde Situation yazılımı altında lagrange yaklaşımı metodu kullanılmıştır. Lee ve diğ. (2009) toplam tersine lojistik ağ maliyetinin minimize edilmesi için çok aşamalı, çok ürünlü, kapasite kısıtlı bir matematiksel model önerilmiştir. Çalışmada, çözüm metodu olarak genetik algoritma sezgiseli kullanılmıştır. Grunow ve Gobbi (2009) Danimarka’da AEEE ürünlerinin belediyeler tarafından toplanması ve geri dönüşümü için KTDP modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada sunulan modelin amacı toplama noktalarından merkezi atık biriktirme noktalarına olan atamaların minimum yapılmasıdır.

Kaçtıoğlu ve Şengül (2010) Erzurum’daki ambalaj atıklarının geri dönüşüm için uygun bir tersine lojistik ağının tasarımı için karma tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Önerilen model altı farklı senaryo için LINGO optimizasyon programı ile çözülmüştür. Pishvae ve diğ. (2010a) çalışmalarında ileri ve tersine lojistik ağlarını içeren bütünleşik bir ağ tasarımı üzerinde durmuşlardır. Toplam maliyet minimize etmek ve lojistik ağın cevap verme yeteneğini maksimize etmek amaçlarını içeren iki amaçlı, tek ürünlü, çok aşamalı, tek periyot için, kapasite kısıtlı (tesisler için), deterministik talep yapısına sahip bir karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli geliştirmişlerdir. Problemin çözümünde genetik algoritma sezgiseli kullanılmıştır. Önerilen modeli çözmek için dinamik yerel arama mekanizmalı çok amaçlı memetik algoritması geliştirilmiştir. Memetik algoritmanın performansı çok amaçlı genetik algoritma ile karşılaştırılmıştır.

Pishvae ve diğ. (2010b) toplama, ayıklama, geri kazanım ve bertaraf tesislerini içeren çok aşamalı tersine lojistik ağı için maliyet minimizasyonu amaçlı KTDP

modeli önerilmiştir. Önerilen modelin çözümünde optimale yakın çözümü bulmak için tavlama benzetimi algoritması ile özel bir koşu arama mekanizması geliştirilmiştir. Salema ve diğ. (2010) çalışmalarında tersine lojistik faaliyetlerini de içeren bir tedarik zincirinin hem satınalma, üretim, depolama ve dağıtım gibi planlama faaliyetlerini, hem de tasarımı için çok aşamalı, çok ürünlü, kapasite kısıtlı KTDOP modeli önermişlerdir. Geliştirilen model Portekiz’de cam sektöründe uygulanmıştır. Sasikumar ve diğ. (2010) kâr maksimizasyonu amaçlı, çok aşamalı tersine lojistik ağ için KTDOP modeli geliştirmişlerdir. Önerilen model kamyon tekerleği yeniden imalatı yapan bir firmada uygulanmıştır. Geliştirilen model tesis yer seçimi ve atama karar değişkenlerini içermektedir. Achillas ve diğ. (2010) AEEE için tersine lojistik ağında düzenleyici ve kanun yapıcılara karar desteği vermek amacıyla çok ürünlü, kapasite kısıtlı, açık döngü bir KTDOP modeli geliştirmiştir. Önerilen model Yunanistan’da uygulaması yapılmıştır.

Demirel ve diğ. (2011) ürünlerin ileri ve geri yönlü akışını dikkate alan genel, bütünleşik bir lojistik ağı için, toplam sistem maliyetini minimize etmek üzere, kapasite kısıtlı, çok aşamalı, çok ürünlü bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Problem, ileri ve geri ağda yer alan tesislerin sayı ve yerlerinin belirlenmesi ile müşteri taleplerinin minimum maliyetle karşılanacağı dağıtım ağının tasarlanması kararlarını içermektedir. Modelin yapısı karmaşık olduğundan sezgisel yöntem ile doğrusal programlamayı birlikte kullanan genetik algoritma tabanlı melez bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Ren ve Ye (2011) çalışmalarında geri dönen ürünlerin toplandığı, ayıklandığı, üretici ya da dağıtıcıların tamir tesisleri için büyük sevkiyatların oluşturulduğu merkezi toplama tesislerinin sayı ve yerlerinin belirlenmesi için KTDOP modeli önermiştir. Modelin çözümünde parçacık sürü optimizasyonu yöntemini kullanılmıştır. Paksoy ve diğ. (2011) çalışmalarında çok ürünlü bir kapalı döngü tedarik zinciri için taşınan ürünlerin gaz emisyon maliyetleri de dahil çeşitli maliyetler arasındaki ilişkileri de inceleyen bir KTP modeli önerilmiştir. Model ileri ve tersine lojistik süreçlerinde taşınan malzemelerin oluşturduğu CO₂ emisyonu maliyetlerini dikkate alması açısından literatüre katkıda bulunmaktadır. Çalışmada ayrıca, CO₂ emisyon oranı, talep kapasite gibi parametreler için farklı senaryolar üretilerek tedarik zincirini çevresel performansı analiz edilmiştir. Khajavi ve diğ. (2011) kapasite kısıtlı, çok aşamalı genel bütünleşik ağ tasarımı için iki amaçlı karma tamsayılı programlama modeli

önermişlerdir. Maliyet minimizasyonu ve cevap verebilirlik maksimizasyonu amaçları ele alınmıştır. Mounir ve diğ. (2011) çok ürünlü, çok periyotlu tersine lojistik ağ tasarımı için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önermişlerdir.

Alumur ve diğ. (2012) tersine lojistik ağ tasarımı problemi için kar maksimizasyonu amaçlı, çok periyotlu, çok ürünlü, kapasite kısıtlı bir KTDP modeli önermiştir. Modelin Almanya’da yıkama makinesi ve çamaşır kurutucuları tersine lojistik ağ tasarımı için uygulaması yapılmıştır. Das ve Chowdhury (2012) farklı kalite seviyelerinde modüler ürünler üreten tersine lojistik ile bütünleşik tedarik zinciri planlama süreci için kar maksimizasyonu amaçlı çok ürünlü, kapasite kısıtlı bir KTP modeli önermişlerdir. Modelde geri dönen ürünler, ürün içindeki modüllerin geri kazanımı ve farklı kalitelere sahip karışık ürün oranı dikkate alınmaktadır. Dat ve diğ. (2012) AEEE için toplam maliyeti minimum yapacak çok ürünlü bir tersine lojistik ağı için matematiksel programlama modeli önermiştir. Önerilen model toplama, ayıklama, geri dönüşüm, tamir ve bertaraf tesislerini içeren çok aşamalı bir ağdır. Tesis yeri seçimi ve tesisler arası akış miktarı modelin karar değişkenleridir. Assavapokee ve Wongthatsanekorn (2012) geri kazanım aktivitelerinin gerçekleştirildiği tersine lojistik ağı için KTDP modeli tasarlamışlardır. Önerilen model elektronik ürünlerin geri kazanımını yapan bir firmaya uygulanarak vaka çalışmasına adapte edilmiştir. Li ve Tee (2012) çalışmalarında e-atıkların geri kazanımı için çok ürünlü, KTDP modeli önermişlerdir. Modelin amacı üretim maliyeti minimizasyonu ve tersine lojistik kısmı için kar maksimizasyonudur. Çalışmada gerçek hayat koşullarındaki belirsizlikler dikkate alınarak belirsiz parametre için senaryo değeri ve buna karşılık gelen olasılık değerinin çarpımlarının kümülatif toplamı ile ifade edilen beklenen değer kısıtları modele eklenmiştir. Achillas ve diğ. (2012) çalışmalarında AEEE için çok amaçlı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Farklı amaçlar ağırlıklandırma metodu optimize edilmiştir. Amaçlar lojistik maliyetleri minimizasyonu, yakıt tüketimi minimizasyonu ve egzoz gazı emisyonu minimizasyonudur.

Eskandarpour ve diğ. (2013) çalışmalarında toplam maliyet, toplam gecikme oranı ve çevresel kirliliğin minimizasyonu amaçlı tersine lojistik ağı için doğrusal olmayan karma tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Modelin çözümünde ise yakın komşu algoritması sezgiseli kullanılmıştır. Önerilen modelin etkinliğini ölçmek için çok amaçlı memetik algoritma ile kıyaslama yapılmıştır. Kannan ve diğ. (2012)

karbon emisyonu tabanlı tersine lojistik ağ tasarımı için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Önerilen modelin amaç fonksiyonu toplam maliyet ve karbon emisyonu minimizasyonudur. Modelin uygulaması plastik sektörü için gerçekleştirilmiştir. Subramanian ve diğ. (2013) çalışmalarında kapalı döngü bir ağ için tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Modelin çözümünde benzetim tavlama algoritması sezgiseli için başlangıç çözümünde Vogel'in yakınsama metodu ve toplam fırsat maliyeti metodu tabanlı sezgisel bir yapı geliştirilerek kullanılmıştır.

3.2 Stokastik Programlama Modelleri

Çalışmanın buraya kadar olan kısmında tersine lojistik ağ tasarımında tüm parametrelerinin bilindiği varsayılan deterministik modelli çalışmalar aktarıldı. Hâlbuki belirsizlik ürün geri kazanım ağlarının karakteristik bir özelliğidir (Fleischmann ve diğ, 2000). Belirsizlik kavramı parametrelerin kesin olarak belirlenmesinin zor olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır (Taha, 2003). Doğrusal programlamanın uygulamalarında bazı parametreler genellikle önceden belirlenmesi mümkün olmayan, belirsiz değişkenlerin etkisi altında kalmaktadır (Hillier ve Lieberman, 2001). Geleneksel deterministik modellerin ağ yapısındaki belirsizlikleri göz önüne almamasından dolayı dinamik gerçek hayat uygulamalarını doğru bir şekilde yansıtamadığı uzun zamanlardan beri bilinmekte olan bir olgudur (Dantzig ve Infanger, 2011). Tersine lojistik ağları ve kapalı tedarik zinciri ağları geri dönen ürünün zaman, miktar ve kalitesi ile ilgili yüksek oranda belirsizlik içermektedir (Chouinard ve diğ, 2008; Ilgin ve Gupta, 2010; Pishvae ve diğ, 2011). Özellikle geri dönen ürünün miktar ve kalitesinin hesaplanması ve kontrolü çok zordur (Qin ve Ji, 2010). Deterministik modeller ise tersine lojistik ağlarının doğasında bulunan miktar, kalite, zaman, ürün yerine getirme süresi vb. belirsizlikleri içeren tersine lojistik ağlarını tasarlamakta eksik kalmaktadır (Lee, 2009). Modeldeki bazı veya tüm parametreler belirsiz olduğu problemlere stokastik programlama problemleri adı verilir (Hillier ve Lieberman, 2001). Kall ve Wallace (1994) çalışmalarında ağ tasarımındaki belirsizlikle başa çıkmak için stokastik programların daha esnek ve etkin olduğunu belirtmektedir. Bunun için araştırmacılar belirsizlikleri gidermek için bazı stokastik model teknikleri geliştirmişlerdir (Ilgin ve Gupta, 2010).

Yapısında belirsizlik olan tersine lojistik ve kapalı döngü ağ tasarım problemleri için kullanılan modelleme yaklaşımları şunlardır: Stokastik optimizasyon (Listeş, 2002; Listeş ve Dekker, 2005; Qiushuang ve Qiaolun, 2007; Salema ve diğ, 2007; Listeş, 2007; Chouinard ve diğ, 2008; Lee ve Dong, 2009; Pishvae ve diğ, 2009; Francas ve Minner, 2009; Mier ve diğ, 2009; Wang ve Zhao, 2009; Wei-min ve Mei-jie, 2009; Fonseca ve diğ, 2010; Kara ve Öñüt, 2010a,b; El-Sayed ve diğ, 2010; Lee ve diğ, 2010; Denizel ve diğ, 2010; Gomes ve diğ, 2011; Ramezani ve diğ, 2013), robust optimizasyon (Realff ve diğ, 2000; Hong ve diğ, 2006; Realff ve diğ, 2004; Pishvae ve diğ., 2011), KTDP modeli ile kuyruk modelinin birleşimi (Lieckens ve Vandaele, 2007), simülasyon modelleri (Kara ve diğ, 2007). Bu çalışmada belirsizlikler altında tersine lojistik ağ tasarımı için stokastik bir model önerileceği için literatür taramasında bu yöndeki çalışmalara ağırlık verilmiştir.

Listeş (2002) kapalı döngü ağ tasarımı için genel bir stokastik programlama modeli önermiştir. Modelde tek aşamalı ileri akış sisteminin iki aşamalı tersine lojistik ağı ile birleştirilmesi düşünülmüştür. Model tersine lojistik türlerinden yeniden imalat seçeneğini ele almaktadır. Problemin talep ve geri dönen ürün miktarı gibi tasarım parametrelerindeki belirsizlik belirli sayıdaki senaryolarla ifade edilmiştir. Önerilen modelin çözümü için kısımlara ayırma tekniği kullanılmıştır.

Listeş ve Dekker (2005) kum geri dönüşüm ağ tasarımı için talep ve geri dönen ürün miktarı belirsizlikleri altında iki stokastik programlama modeli önermektedir. İlk formülasyon talep belirsizliği altında iki aşamalı stokastik optimizasyon modelidir. Bu modelin ilk aşamasında tesis açılma kararları, ikinci aşamada ise talep belirlendikten sonra ilk aşamada açılması belirlenen tesislere olan atamalara karar verilmektedir. İkinci formülasyon ise talep ve geri dönen ürün miktarı belirsizlikleri altında üç aşamalı stokastik optimizasyon modelidir. Bu modelin ilk aşamasında arz gerçekleşmeden önce ilk temizleme tesisi ve ilgili depoların açılması, ikinci aşamada arz gerçekleştikten sonra ek temizleme tesisi ve ilgili depoların açılması, üçüncü aşamada ise talep gözlemlendikten sonra tesislere gerekli atamaların yapılması kararları alınmaktadır. Geliştirilen her iki model de kâr maksimizasyonu amaçlı, iki aşamalı, tek ürünlü, açık döngü ve kapasite kısıtlı stokastik programlama modelleridir. Çalışmada dönen ürün miktarı ve talebin belirsizlikleri senaryo analizleri ile giderilmeye çalışılmıştır. Önerilen modelin Hollanda'da yıkım atıklarından kumun geri dönüştürüldüğü bir gerçek vaka için uygulaması yapılmıştır.

Qiushuang ve Qiaolun (2007) çalışmalarında üretim ve yeniden üretim süreçlerini içeren bir ağ tasarım problemini ele almışlardır. Geri dönen ürün miktarı parametresinin belirsiz olduğu bu problem için stokastik karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Stokastik modelin amaç fonksiyonu yerine getirilemeyen talep ve geri toplanamayan ürünler için ceza maliyetlerini içermektedir.

Listeş (2007), çalışmasında talep ve geri dönen ürün miktarı belirsizlikleri altında kapalı döngü olarak adlandırılan tersine lojistik sistemlerinde imalat ve yeniden imalat konularını birlikte içeren ağın tasarımı için stokastik bir model önermiştir. Önerilen model iki aşamalı, tek ürünlü ve kapasite kısıtlı bir ağ için tasarlanmıştır. Çalışmada talep ve geri dönüşler gibi belirsiz olan önemli tasarım parametrelerinin kritik miktarlarını belirlemek için farklı senaryolar üretilmiştir. Ayrıca problemi etkin bir şekilde çözebilmek için kısımlara ayırma tekniği kullanılmıştır.

Salema ve diğ. (2007), Fleischmann ve diğ. (2001) tarafından geliştirilen tek ürünlü, kapasite kısıtsız ve belirsizlikleri dikkate almayan iyileştirme ağı modeli baz alarak, çok ürünlü, kapalı döngü, kapasite kısıtlı, iki aşamalı, talep ve geri dönüş miktarı belirsizliklerini içeren genel bir iki aşamalı stokastik programlama modeli önerisinde bulunmaktadır. Belirsizlikler belli sayıdaki senaryolarla ifade edilmiştir.

Chouinard ve diğ. (2008) geri kazanma, yeniden işleme ve talep hacimleri belirsizlikleri altında iki aşamalı, çok ürünlü, kapasite kısıtlı, kapalı döngü tersine lojistik ağı tasarımı için stokastik programlama modeli önerisinde bulunmuştur. Yazarlar önerilen modelin çözümü için Monte Carlo yaklaşımı olarak da bilinen, Örneklem Ortalama Tahmini (SAA) tabanlı bir sezgisel kullanmışlardır.

Lee ve Dong (2009), tersine lojistik ağ tasarımının uzun dönemli yapılması gerektiğini belirterek, ağ tasarımını etkileyen faktörlerin bu uzun süreç içerisinde değişebileceğini varsaymışlardır. Çalışmada talep ve geri dönen ürün miktarı belirsizlikleri altında çok ürünlü, kapalı döngü ve çok periyotlu dinamik bir tersine lojistik ağ tasarımı için deterministik model genişletilerek iki aşamalı stokastik programlama (İASP) modeli önerilmiştir. Geliştirilen model sezgisel bir algoritma olan benzetimli tavlama algoritması kullanılarak çözülmüştür.

Pishvae ve diğ. (2009) değişken maliyetler, talep miktarı, geri dönen ürün miktar ve kalitesi belirsizlikleri altında tek periyot, tek ürün, çok aşamalı bütünleşik ileri ve ters

lojistik ağ tasarımı için iki aşamalı stokastik programlama modeli önermiştir. Çalışmada ilk olarak deterministik bir model geliştirilmiş daha sonra bu model belirsizlikleri içerecek şekilde genişletilerek senaryo tabanlı stokastik programlama modeli elde edilmiştir.

Francas ve Minner (2009) üretim ve yeniden üretim işlemlerinin gerçekleştirildiği kapalı döngü bir tedarik zincirinin ağ tasarım problemini ele almışlardır. Bu problem için talep ve geri dönen ürün miktarı belirsizlikleri altında çok ürünlü iki aşamalı stokastik programlama modeli önermişlerdir. Çalışmada iki farklı genel ağ modeli ve iki farklı pazar yapısı olduğu düşünülmüştür. Birincisinde üretim ve yeniden üretim aynı tesiste, diğer modelde ise farklı tesislerde yapılmaktadır.

Mier ve diğ. (2009) tersine bir sistem için yer seçimi problemini ele almışlardır. Çalışmada önerilen deterministik ve deterministik modelin genişletilmesi ile elde edilen stokastik programlama modelleri serpm araması yaklaşımı ile çözülmüştür. Stokastik programlama modelinde toplama ve taşıma maliyetleri ile geri dönüş miktarı belirsizlik içeren parametrelerdir.

Wang ve Zhao (2009) elektrik güç sistemleri zemininde bütünleşik tersine ağ tasarımını ele almışlardır. Bu amaçla poisson dağılımına uyan geri dönen bozulmuş güç malzemeleri miktarı ve elektrik güç malzemeleri talebi belirsizliklerini altında stokastik ağ tasarımı modeli geliştirilmiştir. Önerilen model stokastik simülasyon algoritması ile çözülmüş ve kuramsal sayısal örnekler kullanılarak doğrulama işlemi yapılmıştır.

Wei-min ve Mei-jie (2009) belirsizlik altında üretim ve yeniden üretim bütünleşik lojistik ağlarının optimal tasarımı için tek ürün, kapasite kısıtlı, çok aşama, kapalı döngü, iki aşamalı bulanık programlama modeli geliştirmişlerdir. Belirsiz parametreler sürekli dağılımlı stokastik parametreler, bulanık üçgen ya da tolerans parametrelerinden oluşmaktadır. Bulanık şans kısıtlı programlama yaklaşımı uygulayarak önerilen model tamamen stokastik programlama modeli haline getirilmiştir. Bu modeli çözmek için de melez bir genetik algoritma yaklaşımı geliştirilmiştir.

Fonseca ve diğ. (2010), gerçek hayat koşullarına uygun olarak çok aşamalı, çok ürünlü, teknoloji seçim alternatifli, taşıma maliyeti ve atık üretim miktarının belirsiz olduğu koşullarda tersine lojistik ağ yönetimi için iki aşamalı stokastik karışık

tamsayılı programlama modeli önerisinde bulunmuşlardır. Modelin ilk aşamasında yerleşim kararları gibi stratejik kararlar ilk aşamada ve taşıma kararları gibi taktik/operasyonel kararlar ikinci aşamada alınmıştır. Taşıma maliyeti merkezler arası mesafe farklılıkları ve değişken yakıt fiyatlarından dolayı belirsizlik arz etmektedir. Geliştirilen modelin amaçları, ağın işletme ve kurulum maliyetlerini minimize etmek ve İkinci tersine lojistik tesislerini etkileyen kötü etkileri minimize etmektir. Çalışmada geliştirilen model İspanya Kordoba’da kentsel katı atık, plastik, cam ve kâğıt ürünleri için bir tersine lojistik ağ tasarımı problemine uygulanmıştır.

El-Sayed ve diğ. (2010), çok periyotlu, çok kademeli, tek ürün ve tek amaç için ileri ve geri lojistik ağ tasarımı aynı anda dikkate alan, talep ve geri dönüş oranları belirsizliği altında stokastik karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiştir. Modelde toplam beklenen karın maksimize edilmesi amaçlanmıştır.

Kara ve Önüt (2010a) talep ve geri dönen ürün miktarı belirsizliklerini içeren ters lojistiği de bünyesinde bulunduran kapalı tedarik zinciri ağ tasarım problemini ele almıştır. Çalışmada ele alınan problem için iki aşamalı, tek ürünlü, kapasite ve tesis sayısı kısıtlı, iki aşamalı stokastik programlama modeli önerilmiştir. İlk aşama değişkenleri tesis açılıp kapanma kararları ikinci aşama değişkenleri ise tesisler arası ürün akış miktarlarını temsil etmektedir.

Kara ve Önüt (2010b) çalışmalarında büyük ölçekli kağıt geri dönüşüm firması için belirsizlik altında iki aşamalı stokastik gelir maksimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Bu ağ tasarım problemi tesislerin açılıp kapanma ve tesisler arası taşıma miktarlarının belirlenmesi değişkenlerini içermektedir. Önerilen model iki aşamalı stokastik karışık tamsayılı programlama ve robust programlama yaklaşımlarıyla formüle edilmiştir.

Lee ve diğ. (2010) sürdürülebilir lojistik ağının tasarımı için ilk olarak deterministik bir model geliştirilmiş. Çalışmada, önerilen deterministik modele talep ve geri dönen ürün miktarı belirsizlikleri eklenerek iki aşamalı stokastik programlama modeli geliştirilmiştir. Çalışmada talep ve geri dönen ürün miktarları belirsiz parametrelerdir. Çözüm yaklaşımı olarak yüksek sayıdaki senaryolar için SAA şeması geliştirilmiştir.

Denizel ve diğ. (2010) çalışmalarında kalite belirsizliği altında kapasite kısıtlı, çok periyotlu yeniden üretim operasyonları için ürün planlama problemini ele almışlardır.

Ele alınan problem için kar maksimizasyonu amaçlı stokastik programlama modeli önerilmiştir.

Gomes ve diğ. (2011) çalışmalarında, Salema ve diğ. (2010) tarafından önerilen çok ürünlü, çok periyotlu model geri dönen ürün kalitesi belirsizliği ilavesi ile genişletilerek, bu problem için iki aşamalı senaryo tabanlı bir stokastik programlama modeli geliştirmiştir. Çalışmada müşterilerden gelen ürünün durumunda göre kalite için subjektif bir şekilde düşük, orta ve yüksek şeklinde alternatif senaryolar üretilmiştir. Ürünün kalite durumu geri kazanım oranı ile ilişkilendirilerek herbir kalite senaryosu için farklı bir geri kazanım oranı varsayılmıştır.

Amin ve diğ. (2012) kapalı döngü çok aşamalı tedarik zinciri ağı için ilk aşamada karma tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. İkinci aşamada ise bu modele talep ve geri dönen ürün miktarı belirsizliklerinin eklenmesi ile model Stokastik programlama modeli olacak şekilde genişletilmiştir.

Zeballos ve diğ. (2012) kapalı döngü tedarik zinciri ağı için kalite ve geri dönen miktar ve kalite belirsizlikleri altında senaryo tabanlı iki aşamalı stokastik programlama modeli geliştirmişlerdir. Modelin amacı kar maksimizasyonu olarak belirlenmiştir. Kalite belirsizliği için iyi, orta ve kötü şeklinde üç senaryo ele alınmıştır. Modelin uygulaması Portekiz’de bir cam firmasında gerçekleştirilmiştir.

Hosseinzadeh ve Roghanian (2012) çok ürünlü, çok aşamalı tersine lojistik ağ tasarım problemi için olasılıklı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Modelde kapasite, talep ve geri dönen ürün miktarı parametreleri belirsiz olarak varsayılmıştır. Modelin çözümü için genetik algoritma sezgiseli geliştirilmiştir.

Babazadeh ve diğ. (2012) çok periyotlu, çok aşamalı ve çok ürünlü bütünleşik ağ için stokastik bir MILP ele almışlardır. Modelde talep, geri dönüş oranı ve kalite parametrelerinin belirsiz olduğu varsayılmıştır. Modelin amaç fonksiyonu maliyet ve riskin minimizasyonundan oluşmaktadır.

Ramezani ve diğ. (2013) belirsizlik altında ileri ve tersine lojistik ağ tasarımı için çok amaçlı stokastik programlama modeli geliştirmiştir. Bütünleşik lojistik ağı ileri yönde üç aşama, ters yönde ise toplama ve bertaraf tesisleri olmak üzere iki aşama içermektedir. Modelin amaçları ağıın kar maksimizasyonu, müşteriye cevap verme yeteneği ve kalite seviyesi maksimizasyonudur. Amaçlar arası ilişkiyi tanımlamak

için Pareto analizi kullanılmıştır. Çalışmada fiyat, üretim maliyeti, işleme maliyeti, toplama maliyeti, bertaraf maliyeti, talep ve geri dönüş oranı belirsizlikleri dikkate alınmıştır. Bu belirsizlikler senaryolarla ifade edilmiştir.

3.3 Robust Optimizasyon

Yukarıda bahsedildiği gibi belirsizlikler altında optimizasyonda iki temel yaklaşım bulunmaktadır: stokastik optimizasyon ve robust optimizasyon. Stokastik optimizasyonda belirsiz parametrelerin olasılık dağılımları bilinmekte ve amaç fonksiyonunda beklenen maliyetin minimizasyonu hedeflenmektedir. Robust optimizasyonda ise belirsiz parametrelerin olasılık dağılımları bilinmemekte ve belirsiz parametreler birbirinden bağımsız olarak kesikli senaryolarla ifade edilmekte ve amaç fonksiyonu en kötü senaryo maliyetini ya da pişmanlığın minimize edilmesidir (Snyder ve Daskin, 2006).

Realff ve diğ. (2000) çalışmalarında MILP formülasyonu ve robust optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Modelde farklı sayıdaki senaryoların optimal performansından ağın performansının maksimum sapmalarının minimizasyonu amaçlanmıştır. Geliştirilen model Amerika’da halı sektöründe uygulanmıştır. Realff ve diğ. (2004) talep ve geri dönen ürün miktarları belirsizlikleri altında halı geri dönüşüm ağ tasarımı için robust optimizasyon modeli önermiştir. Model robust çözüm ve optimal çözüm arasındaki sapmayı minimize etmeyi hedeflemektedir. Hong ve diğ. (2006) AEEE ürünleri tersine lojistik ağı için optimal çözümden sapmayı minimum etmeyi amaçlayan senaryo tabanlı robust optimizasyon şeması geliştirmiştir. Pishvae ve diğ. (2011) çalışmalarında geri kazanım, bertaraf gibi tersine lojistik faaliyetlerini içeren kapalı döngü tedarik zinciri tasarım problemi için geri dönen miktar, geri kazanılan ürüne olan talep ve taşıma maliyeti belirsizlikleri altında robust optimizasyon modeli önermiştir. İlk olarak MILP modeli geliştirilerek robust model elde edilmiştir. Geliştirilen modelin performansı farklı problem kümeleri için deterministik modelle karşılaştırılmıştır.

Aşağıda çizelge 3.2, çizelge 3.3 ve çizelge 3.4’te TLAT ile ilgili sırasıyla deterministik model, SP modeli ve robust optimizasyon öneren çalışmalar özetlenmiştir.

Çizelgelerdeki sınıflandırmalarda her bir özelliğe ait ifadeler için, genellikle belli kısaltmalardan yararlanılmıştır. Söz konusu ifade ve karşılıkları çizelge 3.1’de yer almaktadır.

Çizelge 3.1: Sınıflandırmada yer alan ifadeler ve karşılıkları.

Model	Belirsizlikler
TP: Tamsayı Programlama KTP: Karma Tamsayı Programlama KTDP: Karma Tamsayı Doğrusal Programlama KTDP: Karma Tamsayı Doğrusal Olmayan Programlama KTHP: Karma Tamsayı Hedef Programlama SP: Stokastik Programlama SKTDP: Stokastik Karma Tamsayı Doğrusal Programlama SBP: Stokastik Bulanık Programlama HP: Hedef Programlama TDP: Tamsayı Doğrusal Programlama Sim: Simülasyon	R: Geri Dönen Ürün Miktarı Rc: Geri Dönen Bileşen Miktarı Q: Kalite Rr: Geri Dönüş Oranı TS: Tedarik Süresi Rcv: Geri Kazanım Oranı D:Talep Oc: Operasyonel Maliyetler Tc: Taşıma Maliyeti Vc: Değişken maliyetler Sc: Ürün Satış Fiyatı Pc: Üretim Maliyeti Rpc: Yeniden İşleme Maliyeti Cc: Toplama Merkezi Kapasitesi Dr: Bertaraf Oranı Dc: Bertaraf Maliyeti Pv: Üretim hacmi RcQ: Geri kazanılan ürün miktarı Agm: Atık geri alma maliyeti
Amaç Fonksiyonu	Aşama Sayısı
MM: Maliyet Minimizasyonu KM: Kar Maksimizasyonu CRM: Çevresel Risk Minimizasyonu ÇEM: Çevresel Etki Minimizasyonu EM: Enerji Tüketimi Minimizasyonu GM: Geri Dönüş Oranı Maksimizasyonu/ hedefi GMİ: Geri Dönmesi İstenen Atık hedefi DM: Taşıma Mesafesi Minimizasyonu CYM: CO ₂ Emisyonu Minimizasyonu CEM: Karbon gazı Emisyonu Minimizasyonu KEM: Tersine Lojistik Tesislerini Etkileyen Kötü Etkilerin Minimizasyonu MCV: Müşteriye Cevap Verme Yeteneği maksimizasyonu CSM: Müşteri Hizmet Seviyesi maksimizasyonu KSM: Kalite Seviyesi Maksimizasyonu AtM: Atık Minimizasyonu NRWM: Uygun Olmayan Atık Kağıt Hedefi Minimizasyonu WRTM: Atık Kağıt Geri Kazanım Maksimizasyonu AMM: Belediye toplama noktalarına atamaların Minimizasyonu GY:Gecikme Yüzdesi BTM :Birim Taşıma Maliyeti GAKM: Gayri Resmi Atık Sektörünün Kar Maksimizasyonu	2:İki Aşamalı Ç:Çok Aşamalı
	Çözüm Metodu
	TÇ: Tam Çözüm Veren Metot SE: Sezgisel Metot
	Ağ Yapısı
	AD: Açık Döngü KD: Kapalı Döngü
	Karar Değişkenleri
	Y:Tesislerin Açılıp Açılmama Kararı T:Herbir Tesise Gönderilecek Ürün Miktarı P:Toplama Periyodunun Gün Cinsinden Uzunluğu C:Tesis kapasitesi M:İhtiyaç duyulan makine sayısı V: İhtiyaç duyulan araç sayısı İMM: İşlenebilecek malzeme miktarı

Çizelge 3.2: Deterministik modeller ile ilgili TLAT ve modellenmesi yazın çalışmaları.

	Referans	Model	Çözüm Metodu	Aşama Sayısı	Ağ Yapısı	Amaç Fonksiyonu	Ürün Sayısı	Kapasite Kısıtı	Karar Değişkenleri	Uygulama Alanı	Belirsizlikler
1	Spengler ve diğ. (1997)	KTDP	TÇ	2	AD	MM	Çok	Var	Y,T	Demir Çelik	-
2	Barros ve diğ. (1998)	KTDP	TÇ	2	AD	MM	Tek	Yok	Y,T	Kum	-
3	Louwers ve diğ. (1999)	KTDP	TÇ	2	AD	MM	Tek	Var	Y,T	Halı	-
4	Krikke ve diğ. (1999)	KTDP	TÇ	2	AD	MM	Tek	Yok	Y,T	Fotokopi Makinesi	R
5	Fleischmann ve diğ. (2001)	KTDP	TÇ	2 Çok	AD KD	MM	Tek	Yok	Y,T	Fotokopi Makinesi ve Kâğıt	-
6	Shih (2001)	KTP	TÇ	Çok	AD	KM	Çok	Var	Y,T	Bilgisayar ve Elektrikli ev Aletleri	Rr
7	Krikke ve diğ. (2001)	KTDP	TÇ	2	KD	MM, EM, AtM	Çok	Yok	Y,T	Buzdolabı	R,Q
8	Hu ve diğ. (2002)	TP	TÇ	Çok	AD	MM	Çok	Var	T	Tehlikeli Atık	-
9	Jayaraman ve diğ. (2003)	KTDP	SE	2	AD	MM	Tek	Var	Y,T	Tehlikeli Madde	-
10	Beamon ve Fernandes (2004)	KTDP	TÇ	2	KD	MM	Tek	Var	Y,T	Kiralama Firması DVD, Palet vs.	Rr, Oc
11	Kusumastuti ve diğ. (2004)	KTP, Sim	SE	Çok	AD	KM, ÇEM, CYM	Çok	Var	Y,T	Bilgisayar	D, R
12	Lambert ve diğ. (2004)	KTP	TÇ	2	KD	MM	Çok	Yok	Y,T	Sofistike Paketleme Teçhizatları	-
13	Min ve diğ. (2006)	KTDP	SE	2	AD	MM	Tek	Var	Y,T	E-ticaret	-
14	Salema ve diğ. (2006)	KTDP	TÇ	2	KD	MM	Çok	Var	Y,T	Kopyalama Makinesi	-
15	Zhou ve diğ. (2005)	KTDP	SE	2	KD	MM	Tek	Var	Y,T, C	-	-
16	Srivastava ve Srivastava (2006)	KTDP	TÇ	Çok	AD	KM	Çok	Yok	Y,T	Buzdolabı	R
17	Ahluwalia ve Nema (2006)	KTDP	TÇ	Çok	AD	MM, ÇRM	Çok	Var	Y,T	Tehlikeli Atık	R
18	Lu ve Bostel (2007)	KTP	SE	2	KD	MM	Tek	Yok	Y,T	-	-
19	Lieckens ve Vandaele (2007)	KTDP	SE	Tek	AD	KM	Tek	Var	Y,T	-	TS
20	Sahyouni ve diğ. (2007)	KTP	SE	2	KD	MM	Tek	Yok	Y,T	-	-
21	Du ve Evans (2008)	KTDP	SE	2	KD	MM, DM	Çok	Var	Y,T	-	-
22	Srivastava (2008a)	KTDP	TÇ	Çok	AD	KM	Çok	Var	Y,T	Kişisel Bilgisayar	-
23	Demirel ve Gökçen (2008)	KTP	TÇ	Çok	KD	MM	Çok	Var	Y,T	-	Rr
24	Min ve Ko (2008)	KTP	SE	2	KD	MM	Çok	Var	Y,T	-	-
25	Yongsheng ve Shouyang (2008)	KTDP	TÇ	Çok	KD	MM	Tek	Yok	Y,T	-	-
26	Pati ve diğ. (2008)	KTHP	TÇ	Çok	AD	MM, NRWM, WRTM	Çok	Var	Y,Rota,T	Kağıt	-
27	Aras ve diğ. (2008)	KTDP	SE	2	AD	KM	Tek	Var	Y,T	-	Q
28	Lee ve Dong (2008)	KTDP	SE	2	KD	MM	Tek	Var	Y,T	Bilgisayar Parçaları	-

Çizelge 3.2 (devam): Deterministik modeller ile ilgili TLAT ve modellenmesi yazın çalışmaları.

	Referans	Model	Çözüm Metodu	Aşama Sayısı	Ağ Yapısı	Amaç Fonksiyonu	Ürün Sayısı	Kapasite Kısıtı	Karar Değişkenleri	Uygulama Alanı	Belirsizlikler
29	Qi ve Hongcheng (2008)	KTP	TÇ	2	KD	MM	Tek	Var	Y,T	Otomobil	-
30	Gülsün ve diğ. (2008)	KTDOP	SE	2	AD	MM	Tek	Var	Y,T,P	-	-
31	Rivera ve Ertel (2009)	KTP	TÇ	2	KD	MM	Tek	Yok	Y	Otomobil	Rr
32	Lee ve diğ. (2009)	KTDOP	SE	Çok	AD	MM	Çok	Var	Y,T	-	-
33	Xiangru ve diğ. (2009)	KTDOP	TÇ	2	AD	MM	Tek	Var	Y,T	Ev Aletleri	-
34	Xiangru ve Wei (2009)	KTDOP	TÇ	2	AD	MM	Tek	Var	Y,T	Katı Atık	-
35	Shi ve diğ. (2009)	KTDOP	SE	2	AD	MM	Çok	Var	Y,T	Tıbbi Atık	-
36	Mutha ve Pokharel (2009)	KTP	TÇ	Çok	AD	MM	Çok	Var	Y,T	-	R
37	Xie (2009)	KTDOP	SE	Çok	AD	MM	Çok	Var	Y,T	-	-
38	Xanthopoulos ve Iakovou (2009)	KTDOP	TÇ	2	AD	KM	Çok	Var	Y,T	AEEE	D, Rc, R, Rr, Rcv,Dr
39	Wongthatsanekorn (2009)	KTHP	TÇ	2	AD	MM, GM, GMİ	Çok	Var	Y,T,M,V, İMM	Plastik	-
40	Ge ve diğ. (2009)	KTDOP	SE	2	AD	MM	Çok	Yok	Y,T	AEEE	-
41	Cheng (2009)	KTDOP	SE	Çok	AD	MM	Çok	Yok	Y,T	-	-
42	Tian ve diğ. (2009)	KTDOP	SE	2	AD	MM	Tek	Var	Y	Otomobil	-
43	Fathi ve diğ. (2009)	KTP	SE	2	AD	MM, ÇEM	Tek	Var	Y,T	Kağıt	-
44	Pishvae vd. (2010a)	KTDOP	SE	Çok	KD	MM, MCV	Tek	Var	Y,T	-	-
45	Pishvae ve diğ. (2010b)	KTDOP	SE	Çok	KD	MM	Tek	Var	Y,T	-	-
46	Zarei ve diğ. (2010)	KTDOP	SE	Çok	KD	MM	Tek	Var	Y,T	Otomobil	-
47	Lu ve diğ. (2008)	KTDOP	SE	Çok	KD	MM, BTM, ÇEM	Tek	Var	Y,T	-	-
48	Achillas ve diğ. (2010)	KTDOP	TÇ	Çok	AD	MM	Çok	Var	Y,T	AEEE	-
49	Alumur ve diğ. (2012)	KTDOP	TÇ	Çok	AD	KM	Çok	Var	Y,T	AEEE	-
50	Assavapokee ve Wongthatsanekorn (2012)	KTDOP	TÇ	Çok	KD	KM	Çok	Var	Y,T	Elektronik Ürünler	-
51	Das ve Chowdhury (2012)	KTP	TÇ	Çok	KD	KM	Çok	Var	Y,T	-	Q
52	Dat ve diğ. (2012)	KTDOP	TÇ	Çok	AD	MM	Çok	Var	Y,T	AEEE	-
53	Grunow ve Gobbi (2009)	KTDOP	TÇ	Çok	AD	AMM	Tek	Yok	T	AEEE	-
54	Li ve Tee (2012)	KTDOP	TÇ	Çok	AD	MM, GAKM	Çok	Var	Y,T	AEEE	R
55	Paksoy ve diğ. (2011)	KTDOP	TÇ	Çok	KD	MM	Tek	Var	T	-	-
56	Ren ve Ye (2011)	KTDOP	SE	2	AD	MM	Tek	Var	Y, T, P	-	-
57	Salema ve diğ. (2010)	KTDOP	TÇ	Çok	KD	MM	Çok	Var	Y, T	-	-
58	Sasikumar ve diğ. (2010)	KTDOP	TÇ	Çok	AD	KM	Tek	Var	Y, T	Kamyon Lastiği	-
59	Demirel ve diğ. (2011)	KTDOP	SE	Çok	KD	MM	Çok	Var	Y, T	-	-
60	Larijani ve diğ. (2012)	KTDOP	TÇ	Çok	KD	MM	Çok	Var	Y, T	-	-
61	Khajavi ve diğ. (2011)	KTP	TÇ	Çok	KD	MM, MCV	Tek	Var	Y, T	-	-
62	Achillas ve diğ. (2012)	MOLP	TÇ	2	AD	MM, ÇEM, YAKIT Min.	Tek	Var	Y,T	AEEE	-
63	Kannan ve diğ. (2012)	KTDOP	TÇ	Çok	AD	MM, CEM	Tek	Var	Y,T	Plastik	-
64	Eskandarpour ve diğ. (2012)	KTDOP	SE	2	AD	MM, GY, ÇEM	Çok	Var	Y,T	-	-
65	Zhenqiang ve diğ. (2012)	KTDOP	TÇ	Çok	KD	MM	Tek	Yok	Y,T	-	-

Çizelge 3.2 (devam): Deterministik modeller ile ilgili TLAT ve modellenmesi yazın çalışmaları.

	Referans	Model	Çözüm Metodu	Aşama Sayısı	Ağ Yapısı	Amaç Fonksiyonu	Ürün Sayısı	Kapasite Kısıtı	Karar Değişkenleri	Uygulama Alanı	Belirsizlikler
66	Mounir ve diğ. (2011)	KTDP	TÇ	2	AD	MM	Çok	Var	Y,T	-	-
67	Subramanian ve diğ. (2013)	TDP	SE	Çok	KD	MM	Çok	Var	Y,T	-	R
68	Kaçtıoğlu ve Şengül (2010)	KTDP	TÇ	2	AD	MM	Çok	Var	Y,T	Ambalaj Atık	Rcv
69	Lee ve Lee (2012)	KTDP	SE	Çok	KD	MM	Tek	Var	Y,T	-	-

Çizelge 3.3: Stokastik programlama ile ilgili TLAT yazın çalışmaları.

	Referans	Model	Çözüm Metodu	Aşama sayısı	Ağ Yapısı	Amaç Fonksiyonu	Ürün sayısı	Kapasite Kısıtı	Karar değişkenleri	Uygulama alanı	Belirsizlikler
1	Listeş (2002)	SKTDP	TÇ	Çok	KD	MM	Tek	Var	Y,T	Kum	D, R
2	Listeş ve Dekker (2005)	SKTDP	TÇ	2	AD	KM	Tek	Var	Y,T	Kum	D, R
3	Listeş (2007)	SP	TÇ	2	KD	KM	Tek	Var	Y,T	Elektronik Ürün	D, R
4	Salema ve diğ. (2007)	SKTDP	TÇ	2	KD	MM	Tek	Var	Y,T		D, R
5	Chouinard ve diğ. (2008)	SP	SE	Çok	KD	MM	Çok	Var	Y,T	-	Pv, RcQ, D
6	El-Sayed ve diğ. (2010)	SKTDP	TÇ	Çok	KD	KM	Tek	Var	Y,T	-	D, Rr
7	Fonseca ve diğ. (2010)	SKTDP	TÇ	Çok	AD	MM, KEM	Çok	Var	Y,T	Katı Atık	Tc, R
8	Lee ve Dong (2009)	SP	SE	2	KD	MM	Çok	Var	Y,T	-	D, R
9	Francas ve Minner (2009)	SP	TÇ	2	KD	KM	Çok	Var	Y,T	-	D, R
10	Pishvae ve diğ. (2009)	SKTDP	TÇ	Çok	KD	MM	Tek	Var	Y,T	-	D, R, Q, Vc
11	Kara ve Önüt (2010b)	SKTDP	TÇ	2	KD	KM	Tek	Var	Y,T	Katı Atık	D, R
12	Kara ve Önüt (2010a)	SKTDP	TÇ	2	AD	KM	Tek	Var	Y,T	Kâğıt	R
13	Lee ve diğ. (2010)	SKTDP	SE	2	KD	MM	Çok	Var	Y,T	Elektrikli Ürünler	D, R
14	Denizel ve diğ. (2010)	SP	TÇ	2	AD	KM	Tek	Var	T	-	Q
15	Gomes ve diğ. (2011)	SKTDP	TÇ	Çok	KD	MM	Çok	Var	Y,T	Cam	Q
16	Zeballos ve diğ. (2012)	SP	TÇ	Çok	KD	KM	Çok	Var	Y,T	Cam	R,Q
17	Hosseinzadeh ve Roghanian (2012)	SP	SE	Çok	KD	MM	Çok	Var	Y,T	-	D
18	Babazadeh ve diğ. (2012)	SP	TÇ	Çok	KD	MM, CVar	Çok	Var	Y,T	-	D, Rr, Q
19	Amin ve Zhang (2012)	SP	TÇ	Çok	KD	MM	Çok	Var	Y,T	-	D, R
20	Ramezani ve diğ. (2013)	SKTDP	TÇ	Çok	KD	MM, CSM, KSM	Çok	Var	Y,T	-	Sc, Pc, Rpc, Cc, Dc, D, Rr
21	Mier ve diğ. (2009)	SKTDP	SE	2	AD	MM	Tek	Var	Y,T	-	Cc, Tc, R
22	Wang ve Zhao (2009)	SKTDP	SE	2	KD	MM	Tek	Var	Y,T	Elektrik Güç Sistemleri	D, R
23	Wei-min ve Mei-jie (2009)	SBP	SE	Çok	KD	MM	Tek	Var	Y,T	-	R (Bulanık),D (Stokastik)

Çizelge 3.4: Robust optimizasyon ilgili TLAT yazın çalışmaları.

	Referans	Model	Çözüm Metodu	Aşama sayısı	Ağ Yapısı	Amaç Fonksiyonu	Ürün sayısı	Kapasite Kısıtı	Karar değişkenleri	Uygulama alanı	Belirsizlikler
1	Realff ve diğ. (2000)	RP	TÇ	Çok	KD	OSM	Tek	Yok	Y,T	Halı	R
2	Hong ve diğ. (2006)	RP	TÇ	Çok	KD	OSM	Tek	Var	Y,T	Elektronik	R, Agm
3	Pishvae ve diğ. (2011)	RP	TÇ	Çok	KD	MM	Tek	Var	Y,T	-	D, R,Tc

3.4 Yazın Taraması Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yazın taraması sonuçlarına göre incelenen doksan beş adet çalışmanın modelleme türüne göre üç temel kategoriye ayrıldığı görülmektedir.

Bu yazın taramasında incelenen doksan beş çalışmadan altmış dokuz tanesinin tersine lojistik ağ tasarım sürecini bütün parametrelerin belirli olduğu varsayımı altında deterministik olarak modellediklerini, yirmi üç adet çalışmanın ise tersine lojistik ağının karakteristik özelliği olan özellikle geri dönen ürün miktarı, kalitesi ve zamanı gibi parametreleri gerçek hayat koşullarına uygun olarak belirsiz olarak ele alan stokastik programlama modelleri geliştirdikleri görülmektedir. Üç adet çalışmada ise belirsiz parametrelerin olasılık dağılımlarının bilinmediği durumlarda tercih edilen robust programlama yaklaşımını kullandıkları görülmektedir (Bkz Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5: Yazındaki çalışmaların modelleme türüne göre sınıflandırılması.

Model	Yazın çalışmaları	Adet
Deterministik	Spengler ve diğ. (1997); Barros ve diğ. (1998); Louwers ve diğ. (1999); Krikke ve diğ. (1999); Fleischmann ve diğ. (2001); Shih (2001); Krikke ve diğ. (2001); Hu ve diğ. (2002); Jayaraman ve diğ. (2003); Beamon ve Fernandes (2004); Kusumastuti ve diğ. (2004); Lambert ve diğ. (2004); Min ve diğ. (2006); Salema ve diğ. (2006); Zhou ve diğ. (2005); Srivastava ve Srivastava (2006); Ahluwalia ve Nema (2006); Lu ve Bostel (2007); Lieckens ve Vandaele (2007); Sahyouni ve diğ. (2007); Du ve Evans (2008); Srivastava (2008a); Demirel ve Gökçen (2008); Min ve Ko (2008); Yongsheng ve Shouyang (2008); Pati ve diğ. (2008); Aras ve diğ. (2008); Lee ve Dong (2008); Qi ve Hongcheng (2008); Gülsün ve diğ. (2008); Rivera ve Ertel (2009); Lee ve diğ. (2009); Xiangru ve diğ. (2009); Xiangru ve Wei (2009); Shi ve diğ. (2009); Mutha ve Pokharel (2009); Xie (2009); Xanthopoulos ve Iakovou (2009); Wongthatsanekorn (2009); Ge ve diğ. (2009); Cheng (2009); Tian ve diğ. (2009); Fathi ve diğ. (2009); Pishvae ve diğ. (2010a); Pishvae ve diğ. (2010b); Zarei ve diğ. (2010); Lu ve diğ. (2008); Achilles ve diğ. (2010); Alumur ve diğ. (2012); Assavapokee ve Wongthatsanekorn (2012); Das ve Chowdhury (2012); Dat ve diğ. (2012); Grunow ve Gobbi (2009); Li ve Tee (2012); Paksoy ve diğ. (2011); Ren ve Ye (2011); Salema ve diğ. (2010); Sasikumar ve diğ. (2010); Demirel ve diğ. (2011); Larijani ve diğ. (2012); Khajavi ve diğ. (2011); Achilles ve diğ. (2012); Kannan ve diğ. (2012); Eskandarpour ve diğ. (2012); Zhenqiang ve diğ. (2012); Mounir ve diğ. (2011); Subramanian ve diğ. (2013); Kaçtıoğlu ve Şengül (2010); Lee ve Lee (2012)	69
Stokastik	Listeş (2002); Listeş (2007); Salema ve diğ. (2007); Chouinard ve diğ. (2008); El-Sayed ve diğ. (2010); Lee ve Dong (2009); Francas ve Minner (2009); Pishvae ve diğ. (2009); Kara ve Önüt (2010b); Lee ve diğ. (2010); Gomes ve diğ. (2011); Zeballos ve diğ. (2012); Hosseinzadeh ve Roghanian (2012); Babazadeh ve diğ. (2012); Amin ve Zhang (2012); Ramezani ve diğ. (2013); Wang ve Zhao (2009); Wei-min ve Meijie (2009); Listeş ve Dekker (2005); Fonseca ve diğ. (2010); Kara ve Önüt (2010a); Denizel ve diğ. (2010); Mier ve diğ. (2009)	23
Robust	Realff ve diğ. (2000); Hong ve diğ. (2006); Pishvae ve diğ. (2011)	3

3.4.1 Ağ yapısı

Tersine lojistik ağ tasarımı ve modellenmesiyle ilgili yapılmış olan çalışmalar iki kategoride sınıflandırılabilir. Bunlardan ilki sadece tersine akışın ele alındığı

bağımsız modeller ile ileri ve geri akışın birlikte ele alındığı bütünleşik modeller olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu açıdan yazın taraması analiz edildiğinde incelenen doksan beş adet çalışmadan kırk altı tanesinde açık döngü yani bağımsız modeller ele alınmıştır. Geriye kalan kırk dokuz çalışmada ise kapalı döngü olan bütünleşik modeller üzerinde çalışılmıştır.

Deterministik modelli altmış dokuz adet çalışmadan kırk bir tanesi açık döngü ağ tasarım problemini ele alırken geriye kalan yirmi sekiz çalışmada kapalı döngü tersine lojistik ağı tasarlanmıştır (Bkz Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6: Yazındaki deterministik modelli çalışmaların ağ türüne göre sınıflandırılması.

Ağ Türü	Yazın Çalışmaları	Adet
Açık Döngü	Spengler ve diğ. (1997);Barros ve diğ. (1998);Louwers ve diğ. (1999);Krikke ve diğ. (1999);Fleischmann ve diğ. (2001);Shih (2001);Hu ve diğ. (2002);Jayaraman ve diğ. (2003);Kusumastuti ve diğ. (2004);Min ve diğ. (2006);Srivastava ve Srivastava (2006);Ahluwalia ve Nema (2006);Lieckens ve Vandaele (2007);Srivastava (2008a);Pati ve diğ. (2008);Aras ve diğ. (2008);Gülsün ve diğ. (2008);Lee ve diğ. (2009);Xiangru ve diğ. (2009);Xiangru ve Wei (2009);Shi ve diğ. (2009);Mutha ve Pokharel (2009);Xie (2009);Xanthopoulos ve Iakovou (2009);Wongthatsanekorn (2009);Ge ve diğ. (2009);Cheng (2009);Tian ve diğ. (2009);Fathi ve diğ. (2009);Achillas ve diğ. (2010);Alumur ve diğ. (2012);Dat ve diğ. (2012);Grunow ve Gobbi (2009);Li ve Tee (2012);Ren ve Ye (2011);Sasikumar ve diğ. (2010);Achillas ve diğ. (2012);Kannan ve diğ. (2012);Eskandarpour ve diğ. (2012);Mounir ve diğ. (2011);Kaçtoğlu ve Şengül (2010)	41
Kapalı Döngü	Krikke ve diğ. (2001);Beamon ve Fernandes (2004);Lambert ve diğ. (2004);Salema ve diğ. (2006);Zhou ve diğ. (2005);Lu ve Bostel (2007);Sahyouni ve diğ. (2007);Du ve Evans (2008);Demirel ve Gökçen (2008);Min ve Ko (2008);Yongsheng ve Shouyang (2008);Lee ve Dong (2008);Qi ve Hongcheng (2008);Rivera ve Ertel (2009);Pishvae ve diğ. (2010a);Pishvae ve diğ. (2010b);Zarei ve diğ. (2010);Lu ve diğ. (2008);Assavapokee ve Wongthatsanekorn (2012);Das ve Chowdhury (2012);Paksoy ve diğ. (2011);Salema ve diğ. (2010);Demirel ve diğ. (2011);Larijani ve diğ. (2012);Khajavi ve diğ. (2011);Zhenqiang ve diğ. (2012);Subramanian ve diğ. (2013);Lee ve Lee (2012)	28

Sadece stokastik yazınına bakıldığında ise ele alınan yirmi üç adet çalışmadan beş tanesi bağımsız modeller üzerinde çalışırken, geriye kalan on sekiz çalışmada bütünleşik modellere odaklanılmıştır (Bkz Çizelge 3.7).

Çizelge 3.7: Yazındaki SP modelli çalışmaların ağ türüne göre sınıflandırılması.

Ağ Türü	Yazın Çalışmaları	Adet
Açık Döngü	Listeş ve Dekker (2005); Fonseca ve diğ. (2010); Kara ve Önüt (2010a); Denizel ve diğ. (2010); Mier ve diğ. (2009)	5
Kapalı Döngü	Listeş (2002);Listeş (2007);Salema ve diğ. (2007);Chouinard ve diğ. (2008);El-Sayed ve diğ. (2010);Lee ve Dong (2009);Francas ve Minner (2009);Pishvae ve diğ. (2009);Kara ve Önüt (2010b);Lee ve diğ. (2010);Gomes ve diğ. (2011);Zeballos ve diğ. (2012);Hosseinzadeh ve Roghanian (2012); Babazadeh ve diğ. (2012);Amin ve Zhang (2012);Ramezani ve diğ. (2013);Wang ve Zhao (2009);Wei-min ve Mei-jie (2009)	18

3.4.2 Modelleme şekli

Tersine lojistik ağ tasarımının modellenmesinde kullanılan teknikler açısından deterministik modellere ait literatür çalışmaları incelendiğinde karışık tam sayılı doğrusal programlama (örnek: Aras ve diğ., 2008; Min ve Ko, 2008), karışık tam sayılı doğrusal olmayan programlama (örnek: Min ve diğ., 2006;), karışık tamsayı programlama (örnek: Lambert ve diğ., 2004; Lu ve Bostel, 2007; Sahyouni ve diğ., 2007), karışık tamsayı programlama ve simülasyon (Kusumastuti ve diğ., 2004), tamsayı doğrusal programlama (örnek: Subramanian ve diğ., 2013), çok amaçlı doğrusal programlama (Achillas ve diğ., 2012), tamsayı programlama (Hu ve diğ., 2002)) metodlarının kullanıldığı görülmektedir. Bu metodları kullanan çalışmalar ve kullanım miktarları çizelge 3.8’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.8: Yazındaki deterministik modelli çalışmaların model türüne göre sınıflandırılması.

Model Türü	Yazın Çalışmaları	Adet
TDP	Spengler ve diğ. (1997);Barros ve diğ. (1998);Louwers ve diğ. (1999);Krikke ve diğ. (1999);Fleischmann ve diğ. (2001);Krikke ve diğ. (2001);Jayaraman ve diğ. (2003);Beamon ve Fernandes (2004);Salema ve diğ. (2006);Srivastava ve Srivastava (2006);Ahluwalia ve Nema (2006);Du ve Evans (2008);Srivastava (2008a);Yongsheng ve Shouyang (2008);Lee ve Dong (2008);Lee ve diğ. (2009);Xiangru ve diğ. (2009);Shi ve diğ. (2009);Xie (2009);Xanthopoulos ve Iakovou (2009);Pishvae ve diğ. (2010b);Zarei ve diğ. (2010);Lu ve diğ. (2008);Achillas ve diğ. (2010);Alumur ve diğ. (2012);Assavapokee ve Wongthatsanekorn (2012);Dat ve diğ. (2012);Grunow ve Gobbi (2009);Li ve Tee (2012);Paksoy ve diğ. (2011);Salema ve diğ. (2010);Demirel ve diğ. (2011);Kannan ve diğ. (2012);Zhenqiang ve diğ. (2012);Mounir ve diğ. (2011);Kaçtıoğlu ve Şengül (2010);Lee ve Lee (2012)	37
KTP	Shih (2001);Lambert ve diğ. (2004);Lu ve Bostel (2007);Sahyouni ve diğ. (2007);Demirel ve Gökçen (2008);Min ve Ko (2008);Qi ve Hongcheng (2008);Rivera ve Ertel (2009);Mutha ve Pokharel (2009);Fathi ve diğ. (2009);Das ve Chowdhury (2012);Khajavi ve diğ. (2011)	12
KTDOP	Min ve diğ. (2006);Zhou ve diğ. (2005);Lieckens ve Vandaele (2007);Aras ve diğ. (2008);Gülsün ve diğ. (2008);Xiangru ve Wei (2009);Ge ve diğ. (2009);Cheng (2009);Tian ve diğ. (2009);Pishvae vd. (2010a);Ren ve Ye (2011);Sasikumar ve diğ. (2010);Larijani ve diğ. (2012);Eskandarpour ve diğ. (2012)	14
KTHP	Pati ve diğ. (2008);Wongthatsanekorn (2009)	2
KTP-SİM	Kusumastuti ve diğ. (2004)	1
TDP	Subramanian ve diğ. (2013)	1
MOLP	Achillas ve diğ. (2012)	1
TP	Hu ve diğ. (2002)	1

Belirsizlik içeren yirmi üç çalışmanın on üç tanesinde stokastik karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Dokuz adet çalışmada stokastik

programlama yaklaşımı ve bir adet çalışmada da stokastik-bulanık programlama modeli önerilmiştir (Bkz Çizelge 3.9).

Çizelge 3.9: Yazındaki SP modelli çalışmaların model türüne göre sınıflandırılması.

Model Türü	Yazın Çalışmaları	Adet
SKTDP	Listeş (2002);Listeş ve Dekker (2005);Salema ve diğ. (2007);El-Sayed ve diğ. (2010);Fonseca ve diğ. (2010);Pishvae ve diğ. (2009);Kara ve Önüt (2010b);Kara ve Önüt (2010a);Lee ve diğ. (2010);Gomes ve diğ. (2011);Ramezani ve diğ. (2013);Mier ve diğ. (2009);Wang ve Zhao (2009)	13
SP	Listeş (2007);Chouinard ve diğ. (2008);Lee ve Dong (2009);Francas ve Minner (2009);Denizel ve diğ. (2010);Zeballos ve diğ. (2012);Hosseinzadeh ve Roghanian (2012);Babazadeh ve diğ. (2012);Amin ve Zhang (2012)	9
SBP	Wei-min ve Mei-jie (2009)	1

3.4.3 Amaç sayısı

Amaç sayısı açısından çalışmalar incelendiğinde çizelge 3.10’da görüleceği üzere doksan beş adet çalışmadan yetmiş sekiz tanesinde (örneğin Salema ve diğ, 2006; Sasikumar ve diğ, 2010; Listeş, 2002; Gomes ve diğ, 2011; Realff ve diğ, 2000) tek amaç için optimizasyon üzerine odaklanılırken geriye kalan on yedi adet çalışmada ise gerçek hayat koşullarına uygun olarak birden fazla amacın aynı anda optimizasyonu düşünülmüştür (örneğin Krikke ve diğ, 2001; Kusumastuti ve diğ, 2004; Ahluwalia ve Nema, 2006; Du ve Evans, 2008; Pati ve diğ, 2008; Wongthatsanekorn, 2009; Fathi ve diğ, 2009; Achillas ve diğ, 2012; Ramezani ve diğ, 2013).

Toplam altmış dokuz adet deterministik çalışmanın ele önerilen modellerin elli beş tanesine tek amaçlı model geliştirilirken geriye kalan on dört tanesinde çok amaçlı model geliştirilmiştir.

Çizelge 3.10: Yazındaki deterministik modellen çalışmaları amaç sayısına göre sınıflandırılması.

Amaç Sayısı	Yazın Çalışmaları	Adet
Çok Amaçlı	Krikke ve diğ. (2001);Kusumastuti ve diğ. (2004);Ahluwalia ve Nema (2006);Du ve Evans (2008);Pati ve diğ. (2008);Wongthatsanekorn (2009);Fathi ve diğ. (2009);Pishvae vd. (2010a);Lu ve diğ. (2008);Li ve Tee (2012);Khajavi ve diğ. (2011);Achillas ve diğ. (2012);Kannan ve diğ. (2012);Eskandarpour ve diğ. (2012)	14
Tek Amaçlı	Spengler ve diğ. (1997);Barros ve diğ. (1998);Louwers ve diğ. (1999);Krikke ve diğ. (1999);Fleischmann ve diğ. (2001);Shih (2001);Hu ve diğ. (2002);Jayaraman ve diğ. (2003);Beamon ve Fernandes (2004);Lambert ve diğ. (2004);Min ve diğ. (2006);Salema ve diğ. (2006);Zhou ve diğ. (2005);Srivastava ve Srivastava (2006);Lu ve Bostel (2007);Lieckens ve Vandaele (2007);Sahyouni ve diğ. (2007);Srivastava (2008a);Demirel ve Gökçen (2008);Min ve Ko (2008);Yongsheng ve Shouyang (2008);Aras ve diğ. (2008);Lee ve Dong (2008);Qi ve Hongcheng (2008);Gülsün ve diğ. (2008);Rivera ve Ertel (2009);Lee ve diğ. (2009);Xiangru ve diğ. (2009);Xiangru ve Wei (2009);Shi ve diğ. (2009);Mutha ve Pokharel (2009);Xie (2009);Xanthopoulos ve Iakovou (2009);Ge ve diğ. (2009);Cheng (2009);Tian ve diğ. (2009);Pishvae ve diğ. (2010b);Zarei ve diğ. (2010);Achillas ve diğ. (2010);Alumur ve diğ. (2012);Assavapokee ve Wongthatsanekorn (2012);Das ve Chowdhury (2012);Dat ve diğ. (2012);Grunow ve Gobbi (2009);Paksoy ve diğ. (2011);Ren ve Ye (2011);Salema ve diğ. (2010);Sasikumar ve diğ. (2010);Demirel ve diğ. (2011);Larijani ve diğ. (2012);Zhenqiang ve diğ. (2012);Mounir ve diğ. (2011);Subramanian ve diğ. (2013);Kaçtıoğlu ve Şengül (2010);Lee ve Lee (2012)	55

Stokastik programlama modeli önerilen çalışmalar açısından amaç sayısına baktığımızda ise çizelge 3.11’den açıkça görüleceği üzere yirmi üç adet çalışmadan yirmi tanesinin tek amaçlı olduğunu, sadece üç tanesinin çok amaçlı modeller olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak çok amaçlı bir yapının hali hazırda karmaşık olan bir stokastik programlama modelinin çözümünü daha da karmaşık hale getirmesi düşünülmektedir.

Çizelge 3.11: Yazındaki SP modellen çalışmaları amaç sayısına göre sınıflandırılması.

Amaç Sayısı	Yazın Çalışmaları	Adet
Çok Amaçlı	Fonseca ve diğ. (2010); Ramezani ve diğ. (2013); Babazadeh ve diğ. (2012)	3
Tek Amaçlı	Listeş (2002);Listeş (2007);Salema ve diğ. (2007);Chouinard ve diğ. (2008);El-Sayed ve diğ. (2010);Lee ve Dong (2009);Francas ve Minner (2009);Pishvae ve diğ. (2009);Kara ve Öñüt (2010b);Lee ve diğ. (2010);Gomes ve diğ. (2011);Zeballos ve diğ. (2012);Hosseinzadeh ve Roghanian (2012); Amin ve Zhang (2012); Wang ve Zhao (2009);Wei-min ve Mei-jie (2009); Listeş ve Dekker (2005); Kara ve Öñüt (2010a); Denizel ve diğ. (2010); Mier ve diğ. (2009)	20

3.4.4 Amaç çeşitleri

Tersine lojistik ağ tasarım modellerinin amaç fonksiyonları genellikle, kâr maksimizasyonu (örnek: Shih, 2001; Kusumastuti ve diğ, 2004;Srivastava ve Srivastava, 2006; Lieckens ve Vandaele, 2007; Srivastava, 2008a; Aras ve diğ, 2008; Xanthopoulos ve Iakovou, 2009; Alumur ve diğ, 2012; Assavapokee ve Wongthatsanekorn, 2012; Das ve Chowdhury, 2012; Sasikumar ve diğ, 2010; Listeş

ve Dekker, 2005; Listeş, 2007; El-Sayed ve diğ, 2010; Francas ve Minner, 2009; Kara ve Önüt, 2010b; Kara ve Önüt, 2010a; Denizel ve diğ, 2010; Zeballos ve diğ, 2012), maliyet minimizasyonu (örnek: Spengler ve diğ, 1997; Lambert ve diğ, 2004; Min ve diğ, 2006 ; Lu ve Bostel, 2007; Du ve Evans, 2008; Pishvae ve diğ, 2010b; Achilles ve diğ, 2010; Dat ve diğ, 2012; Paksoy ve diğ, 2011; Chouinard ve diğ, 2008; Kaçtıoğlu ve Şengül, 2010; Gomes ve diğ, 2011 ;Wei-min ve Mei-jie, 2009; Ramezani ve diğ, 2013), çevresel risk minimizasyonu (Ahluwalia ve Nema, 2006), çevresel etki minimizasyonu (Kusumastuti ve diğ, 2004; Fathi ve diğ, 2009; Lu ve diğ, 2008; Achilles ve diğ, 2012), enerji tüketimi minimizasyonu (Krikke ve diğ, 2001), geri dönüş oranı maksimizasyonu (Wongthatsanekorn, 2009), geri dönmesi istenen atık hedefi (Wongthatsanekorn, 2009), taşıma mesafesi minimizasyonu (Du ve Evans, 2008), CO₂ emisyonu minimizasyonu (Kusumastuti ve diğ, 2004), karbon gazı emisyonu minimizasyonu (Kannan ve diğ, 2012), Tersine lojistik tesislerini etkileyen kötü etkilerin minimizasyonu (Fonseca ve diğ, 2010), müşteriye cevap verme yeteneği maksimizasyonu (Pishvae ve diğ, 2010a; Khajavi ve diğ, 2011), müşteri hizmet seviyesi maksimizasyonu (Ramezani ve diğ, 2013), kalite seviyesi maksimizasyonu (Ramezani ve diğ, 2013), atık minimizasyonu (Krikke ve diğ, 2001), uygun olmayan atık kâğıt hedefi minimizasyonu (Pati ve diğ, 2008), atık kâğıt geri kazanım maksimizasyonu (Pati ve diğ, 2008), birim taşıma maliyeti minimizasyonu (Lu ve diğ, 2008), gayri resmi atık sektörünün kar maksimizasyonu (Li ve Tee, 2012), gecikme yüzdesi (Eskandarpour ve diğ, 2012), risk değeri (Babazadeh ve diğ, 2012), yakıt minimizasyonu (Achillas ve diğ, 2012) ve belediye toplama noktalarına atamaların minimizasyonu (Grunow ve Gobbi, 2009).

Deterministik modellerde çizelge 3.12’de görüldüğü gibi elli yedi adet çalışmada maliyet minimizasyonu amacına odaklanılırken, on bir adet çalışmada kar maksimizasyonu, beş adet çalışmada çevresel etki minimizasyonu üzerinde durulmuştur. Burada çok amaçlı modelleme konusunda açık bir şekilde literatürde açık olduğu göze çarpmaktadır.

Çizelge 3.12: Yazındaki deterministik modellen çalışmaları amaç türüne göre sınıflandırılması.

Amaç Türü	Yazın Çalışmaları	Adet
Maliyet Minimizasyonu	Spengler ve diğ. (1997);Barros ve diğ. (1998);Louwers ve diğ. (1999);Krikke ve diğ. (1999);Fleischmann ve diğ. (2001);Krikke ve diğ. (2001);Hu ve diğ. (2002);Jayaraman ve diğ. (2003);Beamon ve Fernandes (2004);Lambert ve diğ. (2004);Min ve diğ. (2006);Salema ve diğ. (2006);Zhou ve diğ. (2005);Ahluwalia ve Nema (2006);Lu ve Bostel (2007);Sahyouni ve diğ. (2007);Du ve Evans (2008);Demirel ve Gökçen (2008);Min ve Ko (2008);Yongsheng ve Shouyang (2008);Pati ve diğ. (2008);Lee ve Dong (2008);Qi ve Hongcheng (2008);Gülsün ve diğ. (2008);Rivera ve Ertel (2009);Lee ve diğ. (2009);Xiangru ve diğ. (2009);Xiangru ve Wei (2009);Shi ve diğ. (2009);Mutha ve Pokharel (2009);Xie (2009);Wongthatsanekorn (2009);Ge ve diğ. (2009);Cheng (2009);Tian ve diğ. (2009);Fathi ve diğ. (2009);Pishvae vd. (2010a);Pishvae ve diğ. (2010b);Zarei ve diğ. (2010);Lu ve diğ. (2008);Achillas ve diğ. (2010);Dat ve diğ. (2012);Li ve Tee (2012);Paksoy ve diğ. (2011);Ren ve Ye (2011);Salema ve diğ. (2010);Demirel ve diğ. (2011);Larijani ve diğ. (2012);Khajavi ve diğ. (2011);Achillas ve diğ. (2012);Kannan ve diğ. (2012);Eskandarpour ve diğ. (2012);Zhenqiang ve diğ. (2012);Mounir ve diğ. (2011);Subramanian ve diğ. (2013);Kaçtıoğlu ve Şengül (2010);Lee ve Lee (2012)	57
Kar Maksimizasyonu	Shih (2001); Kusumastuti ve diğ. (2004);Srivastava ve Srivastava (2006);Lieckens ve Vandaele (2007);Srivastava (2008a);Aras ve diğ. (2008);Xanthopoulos ve Iakovou (2009);Alumur ve diğ. (2012);Assavapokee ve Wongthatsanekorn (2012);Das ve Chowdhury (2012);Sasikumar ve diğ. (2010)	11
Çevresel Etki Minimizasyonu	Kusumastuti ve diğ. (2004); Lu ve diğ. (2008); Fathi ve diğ. (2009);Achillas ve diğ. (2012);Eskandarpour ve diğ. (2012)	5
Belediye toplama noktalarına atamaların Minimizasyonu	Grunow ve Gobbi (2009)	1
Yakıt Minimizasyonu.	Achillas ve diğ. (2012)	1
Çevresel Risk Minimizasyonu	Ahluwalia ve Nema (2006)	1
Taşıma Mesafesi Minimizasyonu	Du ve Evans (2008)	1
Enerji Tüketimi Minimizasyonu	Krikke ve diğ. (2001)	1
Atık Minimizasyonu	Krikke ve diğ. (2001)	1
Gayri Resmi Atık Sektörünün Kar Maksimizasyonu	Li ve Tee (2012)	1
Geri Dönüş Oranı Maksimizasyonu/hedefi	Wongthatsanekorn (2009)	1
Geri Dönmesi İstenen Atık hedefi	Wongthatsanekorn (2009)	1
Müşteriye Cevap Verme Yeteneği maksimizasyonu	Pishvae vd. (2010a);Khajavi ve diğ. (2011)	2
Uygun Olmayan Atık Kağıt Hedefi Minimizasyonu	Pati ve diğ. (2008)	1

Çizelge 3.12 (devam): Yazındaki deterministik modellen çalışmaları amaç türüne göre sınıflandırılması.

Amaç Türü	Yazın Çalışmaları	Adet
Atık Kağıt Geri Kazanım Maksimizasyonu	Pati ve diğ. (2008)	1
Gecikme Yüzdesi	Eskandarpour ve diğ. (2012)	1
CO2 Emisyonu Minim�asyonu	Kusumastuti ve diğ. (2004)	1
Karbon gazı Emisyonu Minim�asyonu	Kannan ve diğ. (2012)	1
Birim Taşıma Maliyeti	Lu ve diğ. (2008)	1

Stokastik programlama çalışmaları ise yirmi üç adet çalışmanın on beş tanesinde maliyet minim�asyonu, sekiz tanesinde kâr maksimizasyonu, bir adet çalışmada tersine lojistik tesislerini etkileyen kötü etkilerin minim�asyonu, bir adet çalışmada risk değeri, bir adet çalışmada kalite seviyesi maksimizasyonu ve müşteri hizmet seviyesi maksimizasyonu amaçları ele alınmıştır (Bkz Çizelge 3.13).

Çizelge 3.13: Yazındaki SP modellen çalışmaları amaç türüne göre sınıflandırılması.

Amaç Türü	Yazın Çalışmaları	Adet
Maliyet Minim�asyonu	Listeş (2002); Salema ve diğ. (2007) Chouinard ve diğ. (2008);Fonseca ve diğ. (2010);Lee ve Dong (2009);Pishvae ve diğ. (2009);Lee ve diğ. (2010);Gomes ve diğ. (2011);Hossein-zadeh ve Roghanian (2012);Babazadeh ve diğ. (2012);Amin ve Zhang (2012);Ramezani ve diğ. (2013);Mier ve diğ. (2009);Wang ve Zhao (2009);Wei-min ve Mei-jie (2009)	3
Kar Maksimizasyonu	Listeş ve Dekker (2005);Listeş (2007);El-Sayed ve diğ. (2010);Francas ve Minner (2009);Kara ve Önüt (2010b);Kara ve Önüt (2010a);Denizel ve diğ. (2010);Zeballos ve diğ. (2012)	20
Tersine lojistik tesislerini etkileyen kötü etkilerin minim�asyonu	Fonseca ve diğ. (2010)	1
Risk değeri	Babazadeh ve diğ. (2012)	1
Kalite Seviyesi Maksimizasyonu	Ramezani ve diğ. (2013)	1
Müşteri Hizmet Seviyesi Maksimizasyonu	Ramezani ve diğ. (2013)	1

3.4.5 Ürün sayısı

İncelenen literatür çalışmalarının kırk dokuzunda TL ağlarının tek ürün için tasarlandığı göze çarpmaktadır (örnek: Krikke ve diğ, 1999; Jayaraman ve diğ, 2003; Min ve diğ, 2006; Lieckens ve Vandaele, 2007; Lu ve Bostel, 2007; Fengjiao ve Qingnian, 2008). Hâlbuki gerçek hayatta firmalar çok sayıda ürün üretmekte olduklarından bu durum son zamanlarda bir takım yazarlarca tenkit edilmeye başlanmıştır. İncelenen çalışmaların kırk altı tanesinde çok ürünlü modeller (örnek: Shih, 2001; Hu ve diğ, 2002, Alumur ve Kara, 2005; Salema ve diğ., 2007; Srivastava, 2008; Min ve Ko, 2008) üzerinde durulmuştur.

Deterministik modellenli çalışmalara bakıldığında ise otuz dört adet çalışmada tek ürün için TL ağ tasarımı yapılırken, geriye kalan otuz beş çalışmada da çok ürünlü ağ tasarım modelleri önerilmiştir (Bkz Çizelge 3.14).

Çizelge 3.14: Yazındaki deterministik modellenli çalışmaların ürün sayısına göre sınıflandırılması.

Ürün Sayısı	Yazın Çalışmaları	Adet
Tek	Barros ve diğ. (1998);Louwers ve diğ. (1999);Krikke ve diğ. (1999);Fleischmann ve diğ. (2001);Jayaraman ve diğ. (2003);Beamon ve Fernandes (2004);Min ve diğ. (2006);Zhou ve diğ. (2005);Lu ve Bostel (2007);Lieckens ve Vandaele (2007);Sahyouni ve diğ. (2007);Yongsheng ve Shouyang (2008);Aras ve diğ. (2008);Lee ve Dong (2008);Qi ve Hongcheng (2008);Gülsün ve diğ. (2008);Rivera ve Ertel (2009);Xiangru ve diğ. (2009);Xiangru ve Wei (2009);Tian ve diğ. (2009);Fathi ve diğ. (2009);Pishvae vd. (2010a);Pishvae ve diğ. (2010b);Zarei ve diğ. (2010);Lu ve diğ. (2008);Grunow ve Gobbi (2009);Paksoy ve diğ. (2011);Ren ve Ye (2011);Sasikumar ve diğ. (2010);Khajavi ve diğ. (2011);Achillas ve diğ. (2012);Kannan ve diğ. (2012);Zhenqiang ve diğ. (2012);Lee ve Lee (2012);	34
Çok	Spengler ve diğ. (1997);Shih (2001);Krikke ve diğ. (2001);Hu ve diğ. (2002);Kusumastuti ve diğ. (2004);Lambert ve diğ. (2004);Salema ve diğ. (2006);Srivastava ve Srivastava (2006);Ahluwalia ve Nema (2006);Du ve Evans (2008);Srivastava (2008a);Demirel ve Gökçen (2008);Min ve Ko (2008);Pati ve diğ. (2008);Lee ve diğ. (2009);Shi ve diğ. (2009);Mutha ve Pokharel (2009);Xie (2009);Xanthopoulos ve Iakovou (2009);Wongthatsanekorn (2009);Ge ve diğ. (2009);Cheng (2009);Achillas ve diğ. (2010);Alumur ve diğ. (2012);Assavapokee ve Wongthatsanekorn (2012);Das ve Chowdhury (2012);Dat ve diğ. (2012);Li ve Tee (2012);Salema ve diğ. (2010);Demirel ve diğ. (2011);Larijani ve diğ. (2012);Eskandarpour ve diğ. (2012);Mounir ve diğ. (2011);Subramanian ve diğ. (2013);Kaçtıoğlu ve Şengül (2010)	35

Stokastik programlama literatüründe ise incelenen yirmi üç adet çalışmanın on bir tanesi çok ürünlü, on iki tanesi tek ürünlü modeller öneren çalışmalardır (Bkz Çizelge 3.15).

Çizelge 3.15: Yazındaki SP modelli çalışmaların ürün sayısına göre sınıflandırılması.

Ürün Sayısı	Yazın Çalışmaları	Adet
Tek	Listeş (2002);Listeş ve Dekker (2005);Listeş (2007);Salema ve diğ. (2007);El-Sayed ve diğ. (2010);Pishvae ve diğ. (2009);Kara ve Önüt (2010b);Kara ve Önüt (2010a);Denizel ve diğ. (2010);Mier ve diğ. (2009);Wang ve Zhao (2009);Wei-min ve Mei-jie (2009)	12
Çok	Chouinard ve diğ. (2008);Fonseca ve diğ. (2010);Lee ve Dong (2009);Francas ve Minner (2009);Lee ve diğ. (2010);Gomes ve diğ. (2011);Zeballos ve diğ. (2012);Hosseinzadeh ve Roghanian (2012);Babazadeh ve diğ. (2012);Amin ve Zhang (2012);Ramezani ve diğ. (2013)	11

3.4.6 Çözüm metodu

TL ağ tasarımı literatüründe incelenen çalışmalardan altmış tanesi önerilen modelin çözümde optimal çözüm veren metotlar (Spengler ve diğ, 1997; Beamon ve Fernandes, 2004; Salema ve diğ, 2006; Khajavi ve diğ, 2011; Achillas ve diğ, 2012) kullanmıştır. 35 adet çalışmada (Jayaraman ve diğ, 2003; Kusumastuti ve diğ, 2004; Min ve diğ, 2006; Lu ve Bostel, 2007; Du ve Evans, 2008; Wei-min ve Mei-jie, 2009) ise yaklaşık çözüm veren sezgisel metotlar geliştirilmiştir (Bkz Çizelge 3.16).

Çizelge 3.16: Yazındaki deterministik modelli çalışmaların çözüm metoduna göre sınıflandırılması.

Çözüm Metodu	Yazın Çalışmaları	Adet
Optimal Çözüm	Spengler ve diğ. (1997);Barros ve diğ. (1998);Louwers ve diğ. (1999);Krikke ve diğ. (1999);Fleischmann ve diğ. (2001);Shih (2001);Krikke ve diğ. (2001);Hu ve diğ. (2002);Beamon ve Fernandes (2004);Lambert ve diğ. (2004);Salema ve diğ. (2006); Srivastava ve Srivastava (2006);Ahluwalia ve Nema (2006);Srivastava (2008a);Demirel ve Gökçen (2008);Yongsheng ve Shouyang (2008);Pati ve diğ. (2008);Qi ve Hongcheng (2008);Rivera ve Ertel (2009);Xiangru ve diğ. (2009);Xiangru ve Wei (2009);Mutha ve Pokharel (2009);Xanthopoulos ve Iakovou (2009);Wongthatsanekorn (2009);Achillas ve diğ. (2010);Alumur ve diğ. (2012);Assavapokee ve Wongthatsanekorn (2012);Das ve Chowdhury (2012);Dat ve diğ. (2012);Grunow ve Gobbi (2009);Li ve Tee (2012);Paksoy ve diğ. (2011);Salema ve diğ. (2010);Sasikumar ve diğ. (2010);Larijani ve diğ. (2012);Khajavi ve diğ. (2011);Achillas ve diğ. (2012);Kannan ve diğ. (2012);Zhenqiang ve diğ. (2012);Mounir ve diğ. (2011);Kaçtıoğlu ve Şengül (2010)	41
Sezgisel çözüm	Jayaraman ve diğ. (2003);Kusumastuti ve diğ. (2004);Min ve diğ. (2006);Zhou ve diğ. (2005);Lu ve Bostel (2007);Lieckens ve Vandaele (2007);Sahyouni ve diğ. (2007);Du ve Evans (2008);Min ve Ko (2008);Aras ve diğ. (2008);Lee ve Dong (2008);Gülsün ve diğ. (2008);Lee ve diğ. (2009);Shi ve diğ. (2009);Xie (2009);Ge ve diğ. (2009);Cheng (2009);Tian ve diğ. (2009);Fathi ve diğ. (2009);Pishvae vd. (2010a);Pishvae ve diğ. (2010b);Zarei ve diğ. (2010);Lu ve diğ. (2008);Ren ve Ye (2011);Demirel ve diğ. (2011);Eskandarpour ve diğ. (2012);Subramanian ve diğ. (2013);Lee ve Lee (2012)	28

Bu çalışmalardan deterministik model öneren çalışmaların kırk bir tanesinde optimal çözüm metotları, yirmi sekiz tanesinde de sezgisel çözüm metotları kullanılmıştır.

Çizelge 3.17’de görüldüğü gibi stokastik programlama ile ilgili literatürde, on altı adet çalışmada optimal çözüm veren metotların kullanılmasına karşılık, yedi adet çalışmada model yapısındaki karmaşıklıktan ötürü sezgisel metotlar tercih edilmiştir.

Çizelge 3.17: Yazındaki SP modelli çalışmaların çözüm metoduna göre sınıflandırılması.

Çözüm Metodu	Yazın Çalışmaları	Adet
Optimal Çözüm	Listeş (2002);Listeş ve Dekker (2005);Listeş (2007);Salema ve diğ. (2007);El-Sayed ve diğ. (2010);Fonseca ve diğ. (2010);Francas ve Minner (2009);Pishvae ve diğ. (2009);Kara ve Önüt (2010b);Kara ve Önüt (2010a);Denizel ve diğ. (2010);Gomes ve diğ. (2011);Zeballos ve diğ. (2012);Babazadeh ve diğ. (2012);Amin ve Zhang (2012);Ramezani ve diğ. (2013)	16
Sezgisel çözüm	Chouinard ve diğ. (2008);Lee ve Dong (2009);Lee ve diğ. (2010);Hosseinzadeh ve Roghanian (2012);Mier ve diğ. (2009);Wang ve Zhao (2009);Wei-min ve Mei-jie (2009)	7

3.4.7 Ürün çeşidi

Bu tez çalışmasında ele alınan doksan beş çalışmada önerilen tersine lojistik ağları şu ürünler için geliştirilmiştir. AEEE (Shih, 2001; Xiangru ve diğ, 2009; Xanthopoulos ve Iakovou, 2009; Ge ve diğ. 2009; Achillas ve diğ, 2010; Alumur ve diğ, 2012; Dat ve diğ, 2012;Grunow ve Gobbi, 2009;Li ve Tee, 2012;Achillas ve diğ, 2012; Assavapokee ve Wongthatsanekorn, 2012; Listeş, 2007; Lee ve diğ, 2010; Hong ve diğ, 2006), ambalaj atık (Kaçtıoğlu ve Şengül, 2010), bilgisayar ve bilgisayar parçaları (Srivastava, 2008a; Shih, 2001; Kusumastuti ve diğ, 2004; Lee ve Dong, 2008), Buzdolabı (Krikke ve diğ, 2001; Srivastava ve Srivastava, 2006), cam (Gomes ve diğ, 2011; Zeballos ve diğ, 2012), demir çelik (Spengler ve diğ, 1997), elektrik güç sistemleri (Wang ve Zhao, 2009), e-ticaret (Min ve diğ, 2006), fotokopi makinesi (Krikke ve diğ,1999; Fleischmann ve diğ, 2001), halı (Louwers ve diğ, 1999; Realff ve diğ, 2000), kâğıt (Pati ve diğ, 2008; Fathi ve diğ, 2009; Kara ve Önüt, 2010a; Fleischmann ve diğ, 2001), kamyon lastiği (Sasikumar ve diğ, 2010), katı atık (Xiangru ve Wei, 2009; Fonseca ve diğ, 2010; Kara ve Önüt 2010b)), kum (Barros ve diğ, 1998; Listeş, 2002; Listeş ve Dekker, 2005), otomobil (Qi ve Hongcheng, 2008; Rivera ve Ertel, 2009; Tian ve diğ, 2009; Zarei ve diğ, 2010); plastik (Wongthatsanekorn, 2009; Kannan ve diğ, 2012), sofistike paketleme teçhizatları

(Lambert ve diğ, 2004), tehlikeli atık (Hu ve diğ, 2002; Jayaraman ve diğ, 2003; Ahluwalia ve Nema, 2006), tıbbi atık (Shi ve diğ, 2009).

Çizelge 3.18’de görüleceği üzere stokastik programlama modeli öneren yirmi üç adet çalışmanın on tanesinde cam (Gomes ve diğ, 2011; Zeballos ve diğ, 2012), elektrik güç sistemleri (Wang ve Zhao, 2009), elektrikli ürünler (Listeş, 2007), elektronik ürünler (Lee ve diğ, 2010), kağıt (Kara ve Önüt, 2010a), kum (Listeş, 2002; Listeş ve Dekker, 2005), katı atık (Fonseca ve diğ, 2010; Kara ve Önüt, 2010b) ürünleri için tersine lojistik ağı tasarlanmıştır. Geriye kalan 13 çalışmada ise deneysel veriler kullanılarak model önerisinde bulunulmuş ve herhangi bir ürün ya da ürün grubu için tasarlama yapılmamıştır.

Çizelge 3. 18: Yazındaki SP modelli çalışmaların ürün türüne göre sınıflandırılması.

Ürün Türü	Yazın çalışmaları	Adet
Cam	Gomes ve diğ. (2011); Zeballos ve diğ. (2012)	2
Elektrik güç sistemleri	Wang ve Zhao (2009)	1
Elektrikli ürünler	Listeş (2007)	1
Elektronik ürünler	Lee ve diğ. (2010)	1
Kağıt	Kara ve Önüt (2010a)	1
Kum	Listeş (2002); Listeş ve Dekker (2005)	2
Katı atık	Fonseca ve diğ. (2010); Kara ve Önüt (2010b)	2

3.4.8 Belirsizlikler

Yazında tersine lojistik ağ tasarımı sürecindeki belirsizlikler şu şekilde sıralanabilir: kullanılmış ürün geri dönüş miktarı (örneğin Krikke ve diğ, 1999; Krikke ve diğ, 2001; Kusumastuti ve diğ, 2004; Pishvae ve diğ, 2009; Kara ve Önüt (2010b); Kara ve Önüt 2010a; Lee ve diğ, 2010)), talep (Kusumastuti ve diğ, 2004; Xanthopoulos ve Iakovou, 2009, Francas ve Minner, 2009; Pishvae ve diğ, 2009; Kara ve Önüt, 2010b; Lee ve diğ, 2010), geri dönüş oranı (Shih, 2001; Beamon ve Fernandes, 2004; El-Sayed ve diğ, 2010; Babazadeh ve diğ, 2012; Ramezani ve diğ, 2013), operasyonel maliyetler (Beamon ve Fernandes, 2004), geri dönen ürünlerin kalitesi (örneğin Krikke ve diğ, 2001, Aras ve diğ, 2008, Das ve Chowdhury, 2012), tedarik süresi (örneğin Lieckens ve Vandaele, 2007), özellikle kapalı döngü sistemlerde ürün talep miktarı (örneğin Salema ve diğ, 2007; Xanthopoulos ve Iakovou, 2009; Listeş ve Dekker, 2005), geri kazanım oranı (örneğin Xanthopoulos ve Iakovou, 2009;

Kaçtıoğlu ve Şengül, 2010; Wang, 2008; Tombuş, 2009) ve taşıma maliyetidir (örneğin Fonseca ve diğ, 2009; Mier ve diğ, 2009), Bertaraf Oranı (Xanthopoulos ve Iakovou, 2009), toplama merkezi kapasitesi (Ramezani ve diğ, 2013; Mier ve diğ, 2009), taşıma maliyeti (Fonseca ve diğ, 2010; Mier ve diğ, 2009), değişken maliyetler (Pishvae ve diğ, 2009), geri dönen bileşen miktarı (Xanthopoulos ve Iakovou, 2009), geri dönüş oranı (El-Sayed ve diğ, 2010; Babazadeh ve diğ, 2012; Ramezani ve diğ, 2013), geri kazanılan ürün miktarı (Chouinard ve diğ, 2008), atık geri alma maliyeti (Hong ve diğ, 2006), bertaraf maliyeti (Ramezani ve diğ, 2013), ürün satış fiyatı (Ramezani ve diğ, 2013), üretim maliyeti (Ramezani ve diğ, 2013), yeniden işleme maliyeti (Ramezani ve diğ, 2013).

Bu çalışmalardan deterministik model öneren çalışmalarda ele alınan belirsizlikler ve bu belirsizlikleri ele alan çalışma sayıları çizelge 3.19 'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.19: Yazındaki deterministik modelli çalışmaların belirsizlik türüne göre sınıflandırılması.

Belirsiz Parametre	Yazın Çalışmaları	Adet
Geri Dönen Ürün Miktarı	Krikke ve diğ. (1999); Krikke ve diğ. (2001); Kusumastuti ve diğ. (2004); Srivastava ve Srivastava (2006); Ahluwalia ve Nema (2006); Mutha ve Pokharel (2009); Xanthopoulos ve Iakovou (2009); Li ve Tee (2012); Subramanian ve diğ. (2013)	9
Talep	Kusumastuti ve diğ. (2004); Xanthopoulos ve Iakovou (2009)	2
Kalite	Krikke ve diğ. (2001); Aras ve diğ. (2008); Das ve Chowdhury (2012)	3
Geri Dönüş Oranı	Shih (2001); Beamon ve Fernandes (2004); Demirel ve Gökçen (2008); Rivera ve Ertel (2009); Xanthopoulos ve Iakovou (2009)	5
Geri Kazanım Oranı	Xanthopoulos ve Iakovou (2009); Kaçtıoğlu ve Şengül (2010)	2
Bertaraf Oranı	Xanthopoulos ve Iakovou (2009)	1
Operasyonel Maliyetler	Beamon ve Fernandes (2004)	1
Tedarik Süresi	Lieckens ve Vandaele (2007)	1

Çizelge 3.20'de incelenen yazında stokastik programlama modeli geliştirilen öneren çalışmalarda ele alınan belirsizlikler ve bu belirsizlikleri ele alan çalışma sayıları gösterilmektedir.

Çizelge 3.20: Yazındaki SP modeli çalışmaları belirsizlik türüne göre sınıflandırılması.

Belirsiz Parametre	Yazın Çalışmaları	Adet
Geri Dönen Ürün Miktarı	Listeş (2002);Listeş ve Dekker (2005);Listeş (2007);Salema ve diğ. (2007);Fonseca ve diğ. (2010);Lee ve Dong (2009);Francas ve Minner (2009);Pishvae ve diğ. (2009);Kara ve Önüt (2010b);Kara ve Önüt (2010a);Lee ve diğ. (2010);Zeballos ve diğ. (2012);Amin ve Zhang (2012);Mier ve diğ. (2009);Wang ve Zhao (2009);Wei-min ve Mei-jie (2009);Realff ve diğ. (2000);Hong ve diğ. (2006);Pishvae ve diğ. (2011)	19
Talep	Listeş (2002);Listeş ve Dekker (2005);Listeş (2007);Salema ve diğ. (2007);Chouinard ve diğ. (2008);El-Sayed ve diğ. (2010);Lee ve Dong (2009);Francas ve Minner (2009);Pishvae ve diğ. (2009);Kara ve Önüt (2010b);Lee ve diğ. (2010);Hosseinazadeh ve Roghanian (2012);Babazadeh ve diğ. (2012);Amin ve Zhang (2012);Ramezani ve diğ. (2013);Wang ve Zhao (2009);Wei-min ve Mei-jie (2009);Pishvae ve diğ. (2011)	18
Toplama Merkezi Kapasitesi	Ramezani ve diğ. (2013); Mier ve diğ. (2009)	2
Taşıma Maliyeti	Fonseca ve diğ. (2010); Mier ve diğ. (2009)	2
Kalite	Pishvae ve diğ. (2009); Denizel ve diğ. (2010); Gomes ve diğ. (2011); Zeballos ve diğ. (2012); Babazadeh ve diğ. (2012)	5
Değişken maliyetler	Pishvae ve diğ. (2009)	1
Geri Dönen Bileşen Miktarı	Xanthopoulos ve Iakovou (2009)	1
Geri Dönüş Oranı	El-Sayed ve diğ. (2010);Babazadeh ve diğ. (2012);Ramezani ve diğ. (2013)	3
Geri kazanılan ürün miktarı	Chouinard ve diğ. (2008)	1
Atık geri alma maliyeti	Hong ve diğ. (2006)	1
Bertaraf maliyeti	Ramezani ve diğ. (2013)	1
Ürün Satış Fiyatı	Ramezani ve diğ. (2013)	1
Üretim Maliyeti	Ramezani ve diğ. (2013)	1
Yeniden İşleme Maliyeti	Ramezani ve diğ. (2013)	1

Yukarıda tersine lojistik ağ tasarımı ile ilgili kapsamlı bir yazın taraması ortaya konulmuştur. Yazında, Fleischmann ve diğ. (2000) ve Fleischmann (2003) gelecek çalışmalar için yedi tavsiyede bulunmaktadır: belirsizliklerin tersine lojistik ağ tasarımındaki etkilerini senaryo ve parametrik analizlerle tespit etmek, stokastik modeller geliştirmek, kapalı çevrimli ve bütünleşik ağ tasarımları üzerine odaklanmak, araç rotalama problemini ele almak, çok kademeli ağ tasarımlarını ele almak, envanter yönetimi konusunu irdelemek ve global tedarik zinciri içinde tersine lojistiği incelemek (Chanintrakul ve diğ, 2009). Bu tavsiye edilen konulardan

üzerinde en çok durulan belirsizliklerin ağ tasarımı etkisi ya da belirsizlikleri dikkate alarak tersine lojistik ağ tasarımı yapmak olmuştur.

Chanintrakul ve diğ. (2009) çalışmalarında 2000-2008 yılları arasında tersine lojistik ağ tasarımı ile ilgili kırk bir çalışmayı incelemişlerdir. Bu çalışmalardan on sekiz tanesi talep ve arzda ürün miktar, kalite ve zamanı ile ilgili belirsizlikleri dikkate alan deterministik modellerin önerildiği çalışmalardır. Fakat bu yazın taramasında incelenen çalışmalardan sadece 3 tanesi stokastik modelle ilgilenerek belirsizlikleri dikkate almıştır.

Cimino ve diğ. (2010) yazındaki çalışmaların deterministik ve stokastik olarak iki guruba ayrılabilceğini belirtmektedir. Deterministik çalışmalar TL ağ tasarım süreci ile ilgili belirsizlikleri dikkate almayan, stokastik çalışmalar ise TL ağ tasarım sürecindeki belirsizlikleri modele dâhil eden çalışmalar olarak tanımlanmıştır. Çalışmada ele alınan kırk çalışmanın çoğunun deterministik, stokastik çalışmaların ise çok kısıtlı sayıda olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılara ağ tasarımındaki belirsizlikleri modele dâhil eden stokastik yapıları çalışmalar üzerine odaklanmaları tavsiye edilmiştir.

Pishvae ve diğ. (2009) çalışmalarında tersine lojistik ağ tasarımı ile ilgili geçmişte yapılmış çalışmaların en büyük dezavantajlarından birinin kritik parametreleri deterministik olarak varsaymaları olduğunu belirtmiştir. Hâlbuki ağ tasarımının birkaç yıllık bir süreci etkileyen stratejik bir karar olduğundan, bu zaman sürecinde iş çevresindeki müşteri talebi, geri dönen ürün miktar ve kalitesi gibi bazı parametrelerin belirsiz olarak dikkate alınması gerektiğini beyan etmişlerdir.

Çizelge 3.21’de TLAT belirsizlik literatür özeti sunulmuştur.

Çizelge 3.21: TLAT belirsizlik literatür özet.

Belirsizlik	Açık Döngü	Kapalı Döngü
Talep	Pati ve diğ. (2008)	Min ve Ko (2008)
	Min ve diğ. (2006a) (ve taşıma zamanı)	(ve taşıma zamanı)
Geri dönen miktar	Jayaraman ve diğ. (2003) Realff ve diğ. (2004) (RO) Hong ve diğ. (2006) (+ fiyat) (RO)	Beamon ve Fernandes (2004) Biehl ve diğ. (2007) Min ve diğ. (2006b) (ve taşıma zamanı) (Simülasyon), Du ve Evans (2008) Sasikumar ve diğ. (2010)
Talep & Geri dönen miktar	Listeş ve Dekker (2005) (SP)	Lu ve Bostel (2007) Salema ve diğ. (2007) Listeş (2007) (SP) Lee ve diğ. (2010)(SP) Lee ve Dong (2009) (SP) El-Sayed ve diğ. (2010) (SP) Ko ve Evans (2007)
Talep, Geri dönen miktar & Diğer	Lickens ve Vandaele (2007) (ve yerine getirme süresi)	
Geri dönen miktar & Kalite	<i>Bu çalışmada önerilen model</i> (Çok ürün +gerçek veri +SAA çözüm metodu)	Pishvae ve diğ. (2009) (ve taşıma maliyeti- tek ürün- deneysel veri- tek aşama) (SP)

Yukarıda aktarılan yazın taraması neticesinde belirsizlikleri ele almada tercih edilen SP model çalışmalarında ise şu hususlarda literatürde boşluklar tespit edilmiştir:

- Yazındaki çalışmalar talep ve arzdaki miktar belirsizliğini dikkate almışlardır. Burada yine talep ve arzdaki diğer kalite ve zaman belirsizlikleri de dikkate alınarak model geliştirilmelidir.
- Uygulama alanı açısından çoğu çalışmanın deneysel nitelikte olduğu gerçek veri kullanan çalışmaların çok kısıtlı sayıda olduğu görülmektedir.
- Önerilen modellerin birçoğu problemi daha karmaşık hale getirmemek için tek ürünlüdür. Bu ise gerçek hayat koşullarına uygun değildir.
- İncelenen çalışmaların büyük bir kısmı tek amaçlı modeller önermiştir. Bu durum da gerçek hayat koşullarına uygun düşmemektedir. Burada çok amaçlı modeller kurulması ve karmaşıklığı azaltmak için çok amacı tek amaç haline getiren algoritmalar geliştirilmesi düşünülebilir.

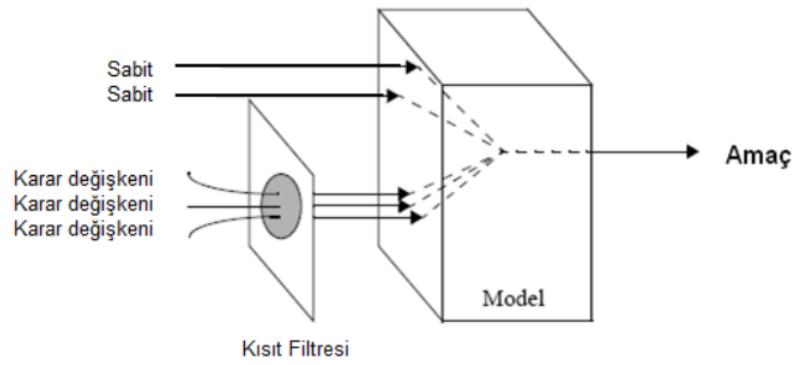
Bu sonuçlardan yola çıkarak, detaylı yazın taraması neticesinde çalışmalardaki eksik noktalar ve gelecek çalışmalar için yapılan önerilerden hareket ederek bu çalışmada,

gerçek hayat koşullarına uygun olacak şekilde, “geri dönen ürün miktarı ve kalite belirsizlikleri altında çok aşamalı çok ürünlü tersine lojistik ağ tasarımı” problemi ele alınmıştır.

4. TEZ KAPSAMINDA KULLANILAN PROGRAMLAMA VE ÇÖZÜM METODU

4.1 Stokastik Programlama

Optimizasyon problemi, fonksiyon katsayıları kesin olarak bilinmekte ise deterministik optimizasyon problemi adını alır (Marti, 2005). Şekil 4.1’de ele alınan bir problem için durum değişkenlerinin değerleri tam olarak bilindiği ve optimizasyon modelindeki tüm girdiler sabit olduğu deterministik model görülmektedir (Taşar, 2010).



Şekil 4.1: Deterministik optimizasyon modeli.

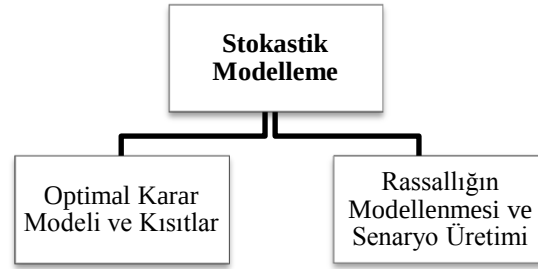
Doğrusal programlamanın uygulamalarında karşılaşılan genel problemlerden birisi, model parametrelerinin uygun değerlerini belirleme güçlüğüdür (Hillier ve Lieberman, 2001). Bir başka deyişle, deterministik optimizasyon problemleri tüm model parametrelerinin belirli olduğu durum için formüle edilmesine rağmen, gerçek hayatta planlama aşamasında her parametrenin bilinir olması çok zordur (Körpeoğlu ve diğ., 2011). Bu şekilde, belirsizlik kavramı parametrelerin kesin olarak belirlenmesinin zor olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır (Taha, 2003). Geleneksel deterministik modellerin bu belirsizlikleri göz önüne almamasından dolayı gerçek hayat uygulamalarını doğru bir şekilde yansıtamadığı uzun zamanlardan beri bilinmekte olan bir olgudur (Dantzig ve Infanger, 2011).

Gerçek hayat problemlerinin çoğunun tabiatında belirsizlikler olduğu için stokastik programlama yaklaşımı bu tür problemlerde deterministik modellere nazaran daha

çok tercih edilmektedir (Kolbin, 1977). Modeldeki bazı veya tüm parametreler belirsiz olduğu problemlere stokastik programlama problemleri adı verilir (Hillier ve Lieberman, 2001).

Belirsizliğin örnekleri; fiziksel belirsizlik (materyal, ağırlık ve boyut gibi fiziksel niceliklerin tam olarak ölçülememesi), ekonomik belirsizlik (piyasa koşullarındaki değişkenlikten dolayı birim fiyatlardaki dalgalanmalar ve talebin düşebilmesi), istatistiksel belirsizlik (sınırlı sayıda örnek veri olmasından dolayı gerçekleşen kestirim hataları) ve model belirsizliği (modelleme hataları) olarak verilebilir (Marti, 2005).

Stokastik programlamanın temelinde işlenen konu, problemle ilgili olan değişkenlerin kullanılmasıyla belirsizliğin ifade edilmesidir. Burada belirsizlik, her bir alternatifin gelecekte ortaya çıkabilecek olası her duruma karşılık gelen sonucudur. Karar verici, gelecekteki durumları tam olarak bilemediğinden meydana gelebilecek her bir durum ve bu durumun sonuçlarını gösteren farklı türde senaryolar türeterek her duruma karşı hazırlıklı olmalıdır. Gelecekte meydana gelebilecek olan durumları öngörebilmenin bir yolu, uygulamada ele alınan problemin yapısına göre değişen belirsizlikler için modelleme yapmaktır (Di Domenica ve diğ, 2007). Bu durum şekil 4.2’ de görülmektedir.



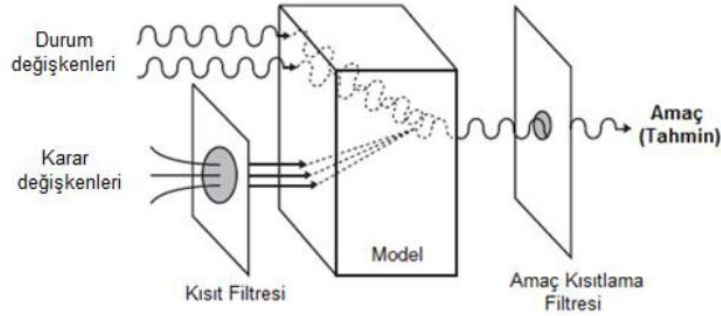
Şekil 4.2: Stokastik programlamanın alt bölümleri.

Veri belirsizliği problem verilerinin bir kısmının rassal değişkenlerle temsil edilmesi demektir. (Birge ve Louveaux, 1997). Bir başka açıdan stokastik programlamada, belirsizliklerle başa çıkabilmek üzere parametrelerin rassal olduğu, fakat istatistiksel uygunluk testlerinden geçmiş verilerden yararlanılarak kestirilebilen olasılık dağılımlarının bilindiği kabul edilir (Shapiro, 2012).

Yukarıda da belirtildiği gibi stokastik programlama belirsizlik ortamında optimal karar verme problemleri ile ilgilidir. Birçok gerçek hayat probleminde bir ya da daha

fazla parametre ile ilgili belirsizlikler olasılık dağılımları yoluyla modellenir (Di Domenica ve diğ, 2007).

Şekil 4.3'te stokastik bir optimizasyon modeli görülmektedir. Karar değişkenlerinin seçilen bir çözüm kümesi için amaç fonksiyonu kesin bir değeri olmayacağı da şeklinden görülmektedir (Taşar, 2010).



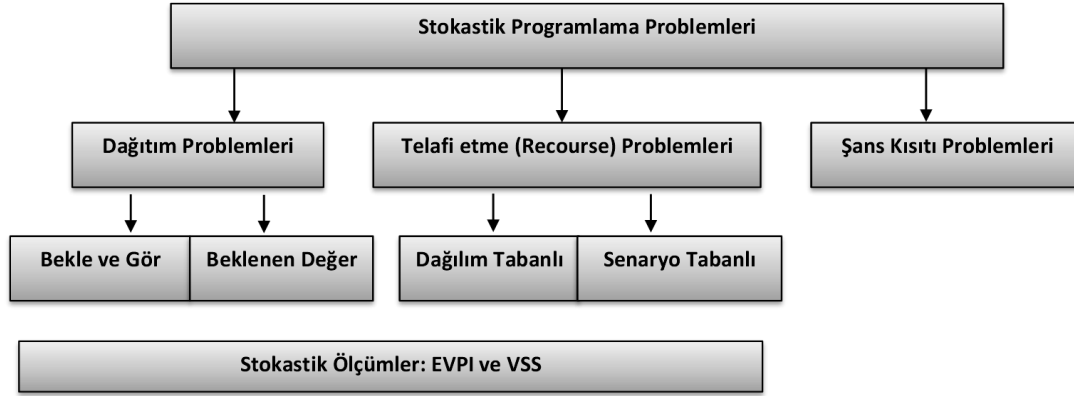
Şekil 4.3: Stokastik optimizasyon modeli.

Stokastik modellerin optimizasyonu, deterministik modellere göre çok daha zordur (Taşar, 2010). Stokastik programlamada verilen kısıtlara ve amaç fonksiyonuna dayanarak optimal karar stratejisi belirlenmeye çalışılırken, probleme ait belirsizlikler hesaba katılarak problem, optimizasyon problemi olarak formüle edilmektedir (Birge ve Louveaux, 1997). Stokastik programlamada genel yaklaşım, problemin gerçek yapısını bozmadan ona eşdeğer olan deterministik duruma dönüştürmektir (Taha 2003).

Stokastik programlama ile ilgili ilk uygulamalardan biri 1956 yılında Ferguson ve Dantzig tarafından ele alınan uçak rotalarının belirlenmesi problemidir (Birge ve Louveaux, 1997). Bu problemde, her bir rota için verilen yolcu talebi dağılımlarından yararlanılarak yolcu kaybı maliyetlerinin beklenen değerini minimize edecek şekilde uçaklar rotalara tahsis edilmektedir (Akdemir, 2012).

Stokastik programlama problemlerinde genel ayırım, statik (tek periyotlu) ve dinamik (çok periyotlu) şeklindedir. Statik problemlerde sonuç mevcut zamanda verilen kararlara bağlıdır, ancak dinamik problemlerde sonuç daha fazla bilginin var olabileceği sonraki periyotlardan da önemli ölçüde etkilenmektedir. Stokastik programlama modelleri, ele alınan doğrusal optimizasyon modelinde belirsizliğin tanımlanmasıyla çeşitli alt gruplara ayrılabilir (Di Domenica ve diğ, 2007).

Sahinidis (2004), şekil 4.4'te görüldüğü gibi çalışmasında belirsizlikler altındaki optimizasyon modellerini, stokastik modeller (telafi etme modelleri, robust programlama ve olasılıksal modeller), bulanık programlama (esnek ve olasılıksal programlama) ve dinamik stokastik programlama olarak sınıflandırmaktadır.



Şekil 4.4: Stokastik programlama problemlerinin sınıflandırılması.

Stokastik telafi etme modelleri ise stokastik doğrusal programlama, stokastik tamsayılı programlama, stokastik doğrusal olmayan programlama ve robust stokastik programlama olarak kendi içinde sınıflara ayrılmaktadır.

Stokastik programlama uygulamaları belirsizlik altında optimizasyon, elektrik güç uygulamaları, ulusal güvenlik, finans, üretim planlama, tedarik zinciri yönetimi, iletişim ağları, taşıma ağları tasarımı ve su kaynakları yönetimi gibi çok geniş bir alanda kullanılmaktadır (Birge ve Louveaux, 1997; Dupacova, 2002; Di Domenica ve diğ, 2007; Bayraksan ve Morton, 2011).

4.1.1 Temel kavramlar

Gerçek hayat koşullarında ele problemlerin birçok parametresi belirsiz olarak düşünülebilir ve bu parametreler rassal değişken olarak tanımlanabilir. Belirsizlik, rassal deneyler sonucu elde edilen çıktılarla (ω) temsil edilmektedir. Bütün çıktıların kümesi ise Ω ile ifade edilir. Burada önemli olan bu çıktıları tam olarak belirlemek değil, bu çıktıların rassal değişkenlere olan etkisidir. Bu çıktılar, olay olarak ifade edilen Ω 'nin altkümesi olarak biraraya getirilebilir. A biraraya toplanmış rassal olaylar kümesini ifade etmektedir. Eğer Ω bir zarın altı olası sonucundan oluşuyorsa A dörtten küçük tek sayıları içerebilir. Her $A \in \mathcal{A}$ olayı, olasılık değeri olarak adlandırılan $P(A)$ ile ilişkilendirilir ve $0 \leq P(A) \leq 1$, $P(\emptyset) = 0$, $P(\Omega) = 1$ ve eğer $A_1 \cap A_2 = \emptyset$ ise $P(A_1 \cup A_2) = P(A_1) + P(A_2)$ ' dir.

(Ω, A, P) birçok şartı sağlaması gereken olasılık uzayı olarak isimlendirilir. A 'daki rassal olaylardan etkilenen birkaç rassal değişken tanımlamak mümkündür. Mesela Ω bir ülkedeki e-atık toplama miktarını ifade eden olaylar kümesi ise nüfus yoğunluğu, toplama fiyatı ve halkın bilinçlendirilmesi gibi birçok değişken bu rassal olaydan etkilenebilir.

Stokastik programlamada ω ile yakından ilişkisi olan rassal değişkenlerin tanımlanması senaryo adı verilen $\omega \in \Omega$ ögeleri kullanılır. Tüm rassal ögeler birleşik olarak sonlu sayıda birçok senaryoya bağlıdır. Birçok durumda Ω ve A 'yı oluşturmak çok zordur. Bu yüzden sadece rassal değişkenlerle ilgili bilgi sahibi olmak yeterli olmaktadır. Herhangi bir rassal ξ değişkeni için birikimli dağılım, $F_\xi(x) = P(\xi \leq x)$ ya da daha doğru şekliyle $F_\xi(x) = P(\{\omega \mid \xi \leq x\})$ şeklinde tanımlanmaktadır.

Burada iki ana durum düşünülebilir. Kesikli rassal değişken, sınırlı ya da sayılabilir sayıda farklı değerlerden oluşur. Kesikli rassal değişken önemli bir sınıf teşkil etmektedir. Uygulamalarda direkt ya da sürekli bir dağılımın örnekleme olması yoluyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bir başka deyişle senaryolar direkt kesikli dağılımdan ya da rassal değişkenlere ait sürekli olasılık dağılımlarının kesikli hale getirilmesiyle de oluşturulabilir (Werner, 2004). Bu rassal değişken, olası sonuçların bir listesi olan olasılık dağılımı tarafından en iyi şekilde açıklanabilir (Birge ve Louveaux, 1997).

$\xi^k, k \in K$ şeklinde tanımlanır ve olasılık değeri $f(\xi^k) = P(\xi = \xi^k)$ ve $\sum_{k \in K} f(\xi^k) = 1$ 'dir. Sürekli değişkenler daha çok yoğunluk fonksiyonu olarak adlandırılan $f(\xi)$ ile ifade edilir. $[a, b]$ aralığında bulunan ξ 'nin olasılık değeri $P(a \leq \xi \leq b) = \int_a^b f(\xi) d\xi$ ya da eşdeğer bir ifade ile değeri $P(a \leq \xi \leq b) = \int_a^b df(\xi)$ 'dir. Burada $F(\cdot)$ ise birikimli dağılımdır. Kesikli durumun tersine olarak, tek bir değer a için $P(\xi = a)$ sürekli bir rassal değişken için her zaman 0 olur. $F(\cdot)$ dağılımı $\int_a^b df(\xi) = 1$ şeklinde olmalıdır. Rassal bir değişken için beklenen değer, kesikli durum için $\mu = \sum_{k \in K} \xi^k f(\xi^k)$ ve sürekli durumda da $\mu = \int_{-\infty}^{\infty} \xi df(\xi)$ şeklinde hesaplanır (Birge ve Louveaux, 1997).

4.1.2 Stokastik programlamada kararlar ve aşamalar

Bazı problem verilerinin belirsiz olarak düşünüldüğü stokastik programlama modellerinde, belirsizlik bertaraf edildikten sonra bazı kararlar alınabilmektedir. Veri belirsizliği problemdeki verilerin bazılarının rassal değişkenler şeklinde ifade edilebilmesi demektir (Gupta ve Grossmann, 2011). Rassal değişkenlerin doğru bir olasılıksal açıklamasının, olasılık dağılımları, yoğunluk fonksiyonları ve olasılık ölçümleri altında yapılabileceği varsayılmaktadır. Normalde birçok rassal değişken $\xi = \xi(\omega)$ rassal deneyler neticesinde bilinebilmektedir.

Karar kümeleri iki gruba ayrılır:

- Bazı kararlar rassal deney yapılmadan önce alınmalıdır. Bu kararlara birinci aşama değişkenleri adı verilir ve bu kararların alındığı periyod birinci aşama olarak adlandırılır.
- Bazı kararlar rassal deney yapıldıktan sonra alınabilir. Bu kararlara ikinci aşama değişkenleri adı verilir ve bu kararların alındığı periyod ikinci aşama olarak adlandırılır.

Birinci aşama kararları x vektörü ile temsil edilirken, ikinci aşama kararları y , $y(\omega)$ ya da $y(\omega, x)$ ifade edilebilir. Olayların ve kararların sırası şu şekilde özetlenebilir: $x \rightarrow \xi(\omega) \rightarrow y(\omega, x)$. Burada değişkenlerin birinci ve ikinci aşama değişkeni olması, kararların rassal deneyin öncesinde ya da sonrasında verilmesiyle ilgilidir (Birge ve Louveaux, 1997).

4.1.3 İki aşamalı stokastik programlama

Stokastik programlama modellerinin en yaygın uygulama ve çalışmaları iki aşamalı doğrusal stokastik programlamadır (Shapiro ve Philpott, 2007; Korpeoğlu ve diğ., 2011). Doğrusal iki ve çok aşamalı stokastik programlama ilk olarak Dantzig (1955) ve Beale (1955) tarafından çalışılmıştır (Frauendorfer ve diğ., 2011).

İki aşamalı stokastik programlamanın temelinde yatan fikir, telafi etme (recourse) kavramıdır. Belirli kararlar iki aşamalı olabilir; bazen ilk aşamada kararlar alınır, ancak elde edilecek ek bilgiler ile gelecekteki belirsizliğin ortadan kalkmasıyla alınan bu kararların sonraki aşamada düzeltilmesi gerekebilir. Rassal bir olay gerçekleşmeden önce alınan kararların sonraki aşamada dengelenmesine düzeltme faaliyetleri denir. İki aşamalı problem olarak adlandırılan bu problemde, önce

başlangıç tahsisleri yapılır, sonrasında stokastik olaylar gözlemlenir ve ardından ilk tahsislerin ya da stokastik olayın şart koştuğu kısıtlar çerçevesinde kalan kaynaklar yeniden tahsis edilir. Görüldüğü gibi burada, bazı kararlar stokastik olay gerçekleşmeden alınır, bazı kararlar ise ilk aşamada alınan kararlara ve stokastik olaylara bağlı olarak ikinci aşamada alınır (Akdemir, 2012).

Klasik iki aşamalı doğrusal stokastik programlama aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\text{Min } z = c^T x + E_{\xi}[\min q(\omega)^T y(\omega)] \quad (4.1)$$

$$\text{s.t. } Ax \geq b, \quad (4.2)$$

$$T(\omega)x + W y(\omega) = h(\omega), \quad (4.3)$$

$$x \geq 0, y(\omega) \geq 0. \quad (4.4)$$

Birinci aşama ve ikinci aşama arasındaki farklılık bir önceki bölümde belirtilmiştir. Birinci aşama kararları $n_1 \times 1$ boyutlu x vektörü ile ifade edilir. x ile ilgili birinci aşama vektör ve matrisleri sırasıyla $n_1 \times 1$, $m_1 \times 1$, $m_1 \times n_1$ boyutlu c , b ve A 'dır. İkinci aşamada belli sayıda rassal olaylar ($\omega \in \Omega$) gerçekleşebilir. Belirlenen bir ω için, ikinci aşama problem verileri sırasıyla $n_2 \times 1$, $m_2 \times 1$, $m_2 \times n_2$ boyutlu $q(\omega)$, $h(\omega)$ ve $T(\omega)$ matrisleri olarak bilinir hale gelir.

Bu yüzden q , T , h 'nin her bir bileşeni de birer rassal değişkendir. $T_i(\omega)$, $T(\omega)$ 'nin i . satırı olsun. İkinci aşama verilerinin stokastik bileşenlerini bir araya getirirsek $N = n_2 + m_2 + m_2 \times n_2$ bileşenli $\xi^T(\omega) = (q(\omega)^T, h(\omega)^T, T_1(\omega), \dots, T_{m_2}(\omega))$ vektörü elde edilir. Daha önce işaret edildiği gibi tek bir ω rassal olayı, ξ 'nin bileşenleri olan birkaç rassal değişkeni etkiler.

Ayrıca ξ 'nin destekleyicisi olan $\Xi \in \mathcal{R}^N$ ve $P(\Xi) = 1$ olacak şekilde $\mathcal{R}^N$ 'nin en küçük kapalı altkümesi olsun. ω belirlendikten sonra ikinci aşama problem verileri olan q , T ve h bilinir hale gelir. Daha sonra ikinci aşama kararları olan $y(\omega)$ ya da $y(\omega, x)$ alınır. y 'nin ω 'ye olan bağımlılığı q 'nın ya da diğer parametrelerin ω 'ye olan bağımlılığından tamamen farklı bir tabiattadır. Fonksiyonel değil basit olarak işaret eder ki y 'nin farklı ω 'ler altında aynı değeri almamaktadır.

Amaç fonksiyonu (4.1), deterministik bir terim olan $c^T x$ ve tüm ω rassal olaylarının gerçekleşmesiyle oluşan ikinci aşama amaç fonksiyonunun beklenen değerini $q(\omega)^T$

$y(\omega)$ içermektedir. Bu ikinci aşama terimi en zordur. Çünkü her bir ω için $y(\omega)$ değeri doğrusal programın çözümüdür. Bu duruma vurgu yapmak için genellikle deterministik eşdeğer programı notasyonu kullanılır. Her bir gerçekleşen ω için ikinci aşama değer fonksiyonu aşağıdaki gibi olur:

$$Q(x, \xi(\omega)) = \min\{q(w)^T y \mid W = h(\omega) - T(\omega)x, y \geq 0\} \quad (4.5)$$

Sonra, aşağıdaki gibi beklenen ikinci aşama değer fonksiyonu tanımlanır:

$$\Theta(x) = E_{\xi} Q(x, \xi(\omega)) \quad (4.6)$$

Sonuç olarak Deterministik Eşdeğer Program aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\text{Min} \quad z = c^T x + \Theta(x) \quad (4.7)$$

$$\text{s.t.} \quad Ax \geq b, \quad (4.8)$$

$$x \geq 0. \quad (4.9)$$

Yukarıda belirtildiği gibi stokastik programlama beklenen değer hesabı içermektedir (Nesterov ve Vial, 2008). Belirsizlikle başa çıkabilmek için, stokastik programlama problemi genellikle lineer ya da lineer olmayan eşdeğer deterministik programlama problemine dönüştürülür. Sonrasında standart çözüm yöntemlerinden biri kullanılarak lineer ya da lineer olmayan programlama problemi çözülür (Werner, 2004).

SP'nin bu şekilde ifade edilmesi, deterministik formülasyondan olan asıl farklılığın ikinci aşama değer fonksiyonunda olduğunu gösterir. Eğer bu fonksiyon belirlenirse, stokastik program sıradan bir doğrusal olmayan modele dönüşür. (4.7)-(4.9)'da verilen formülasyon iki aşamalı SP'nin en basit halidir. Modele kolaylıkla çeşitli ilaveler yapılabilir. Örneğin ilk aşama ve ikinci aşama kararları tam sayılı değişken olabilir. Benzer şekilde doğrusal olmayan ilk aşama ve ikinci aşama amaçları ve kısıtlar kolaylıkla modele eklenebilir (Birge ve Louveaux, 1997).

4.1.4 Bilginin değeri ve stokastik çözüm

Stokastik programların çözümünün zor olmasına ilişkin bir üzü vardır. Gerçek hayat koşullarındaki olaylarla karşı karşıya kalan birçok kişi çözümü kolaylaştıran yöntemleri tercih etmektedir. Örneğin en çok kullanılan basitleştirme metotları, tüm rassal değişkenlerin beklenen değerler ile değiştirilmesi ile elde edilen deterministik program ya da her biri bir senaryoyu ifade eden birçok deterministik programı

çözmek ve bu farklı sayıdaki çözümleri sezgisel bir metot kullanarak birleştirmektir. Burada akla uygulanan bu çözüm metotlarının en uygun değere yakın olup olmadığı ya da tamamen geçersiz olup olmadığı soruları doğal olarak gelmektedir (Birge ve Louveaux, 1997). Bu sorulara teorik cevap iki kavram ile verilmektedir: mükemmel bilginin beklenen değeri ve stokastik çözümün değeri.

4.1.4.1 Mükemmel bilginin beklenen değeri

Ele alınan problemde, karar almadan önce rassal değişkenin değerini bilmek bilmeden önce karar vermektan daha iyidir. Bu iki beklenen amaç değerinin arasındaki fark mükemmel bilginin beklenen değeri olarak adlandırılmaktadır. (Kall ve Wallace, 1994). Mükemmel bilginin beklenen değeri (MBBD), karar vericinin gelecekle ilgili doğru bilgiye ödemeye hazır olduğu maksimum miktardır. MBBD kavramı ilk olarak geliştirildi ve klasik bir referans olarak Raiffa and Schlaifer (1961) tarafından kullanılmıştır (Birge ve Louveaux, 1997). Küçük MBBD modelde rassallığın küçük bir rol oynadığını göstermektedir (Kall ve Wallace, 1994).

Belirsizlik birçok sayıdaki senaryo ile modellenmiş olsun. ξ birçok farklı senaryonun gerçekleşmesine tekabül eden bir rassal değişken olsun.

$$\text{Min } z(x, \xi) = c^T x + \min\{q^T y | Wy = h - Tx, y \geq 0\} \quad (4.10)$$

$$\text{s.t. } Ax = b, x \geq 0 \quad (4.11)$$

$x(\xi)$ yukarıdaki problem için bazı en uygun çözümleri ifade etsin. Senaryo yaklaşımına göre, her senaryo için problemin tüm $x(\xi)$ çözümleri ve bunlarla ilgili amaç fonksiyonlarını $z(x(\xi), \xi)$ bulmakla ilgilenilmektedir. Bu arama dağılım problemi olarak bilinir, çünkü ξ açısından $x(\xi)$ ve $z(x(\xi), \xi)$ 'nin dağılımını aramaktadır. Dağılım problemi, doğrusal programlamadaki duyarlılık ya da parametrik analizlerin genelleştirilmiş hali olarak görülebilir. Burada bu $x(\xi)$ ve $z(x(\xi), \xi)$ değerlerini hesaplandığı varsayılırsa, literatürde bekle ve gör (BG) çözümü olarak bilinen, bu değerlerin beklenen değerini hesaplayabiliriz.

$$BG = E_{\xi} [\min_x(x, \xi)] = E_{\xi} z(\bar{x}(\xi), \xi) \quad (4.12)$$

Bekle ve gör problemleri karar verici en uygun karar uygulamadan önce belirsizlik çözümlene kadar her nasılsa bekleyebileceğini varsaymaktadır. Bu yaklaşım gelecek hakkındaki mükemmel bilgiye dayanmaktadır. Böyle çözüm için bir varsayımdan dolayı uygulanamaz ve pasif yaklaşım olarak bilinir. Bekle ve gör modelleri amaç

değerinin olasılık dağılımlarını analiz etmek için sık sık kullanılmaktadır. Her bir senaryo ile ilişkili doğrusal programlamanın bir ailesinden oluşmaktadır (Di Domenica ve diğ, 2007).

Burada ve şimdi (BŞ) çözümü ise geleceğin bilinmeden çözümün yapıldığı stokastik programlama çözümüdür. Artık, bekle ve gör (BG) çözümü ile burada ve şimdi (BŞ) çözümü karşılaştırılabilir. Burada ve şimdi (BŞ) çözümü x^* optimal çözümü ile daha önce açıklanan aşağıdaki denkleme tekabül etmektedir:

$$BŞ = \min_x E_{\xi} z(x, \xi) \quad (4.13)$$

MBBD, tanımından da çıkartılabildiği gibi BŞ çözümü ile BG çözümü arasındaki farktır (Birge ve Louveaux, 1997).

$$MBBD = BŞ - BG \quad (4.14)$$

4.1.4.2 Stokastik çözümün değeri

Pratikte birçok insan BG çözümünün bulunmasının ya da muadil olarak dağılım probleminin çözümünün hala çok zahmetli ve zor olduğuna inanmaktadır. Bu zorluk özellikle BG çözümünün tek çözüm yerine bir çözüm kümesi sunduğu zamanlarda ortaya çıkmaktadır.

Daha basit yapıda bir problem çözmek için tüm rassal değişkenleri beklenen değerleri ile değiştirerek modele dâhil etmek (Di Domenica ve diğ, 2007) ve böylece problemi deterministik beklenen değer problemine dönüştürmek araştırmacılara daha cazip gelmektedir. Bu probleme beklenen değer (BD) problemi denilmekte ve şu şekilde ifade edilmektedir:

$$BD = \min_x z(x, \bar{\xi}) \quad (4.15)$$

$\xi = E(\xi)$, ξ 'nin beklenen değeridir. (4.15)'nin en uygun çözümü beklenen değer çözümü olarak adlandırılan $\bar{x}(\bar{\xi})$ olsun. Stokastik programlamaya ya da gerçek hayattaki belirsizliklere vakıf olmak isteyen birisi $\bar{x}(\bar{\xi})$ kararı hakkında tavsiye alırken biraz güvensizlik duyar. Gerçekten eğer $\bar{x}(\bar{\xi})$ ξ 'den bağımsız olmazsa, $\bar{x}(\bar{\xi})$ 'nin BŞ 'nin çözümüne yakın olduğuna inanılması için bir sebep kalmaz. Stokastik çözümün değeri BŞ, $\bar{x}(\bar{\xi})$ 'nin ne kadar iyi ya da kötü bir karar olduğu ölçen bir kavramdır. İlk olarak BD çözümünün beklenen değeri (BDÇBD) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$BDÇBD = E_{\xi} (z(\bar{x}(\bar{\xi}), \xi)) \quad (4.16)$$

$x(\xi)$ 'nin stokastik modelde nasıl bir performans gösterdiğini ölçen BDÇBD miktarı, ikinci aşama kararlarının $\bar{x}(\bar{\xi})$ ve ξ 'nin fonksiyonları olarak optimal şekilde seçilmesine izin verir. Böylece stokastik çözüm değeri SÇD şu şekilde hesaplanır:

$$SÇD = BDÇBD - BŞ \quad (4.17)$$

Aşağıdaki temel eşitsizlikler Madansky (1960) tarafından oluşturulmuştur:

$$BG \leq BŞ \leq BDÇBD, BD \leq BG \quad (4.18)$$

$$0 \leq MBBD, 0 \leq SÇD, SÇD \leq BDÇBD - BD, MBBD \leq BDÇBD - BD \quad (4.19)$$

İncelenen durumlarda sonuçların bu eşitsizliklere uyup uymadığı kontrol edilmelidir (Birge ve Louveaux, 1997).

İki aşamalı stokastik programlar için çözüm metotları iki ana kategoriye ayrılmaktadır:

1. Ayırıştırma metotlarını içeren tam metotlar (L-shaped metodu) (Birge, 1997) ve düzenlenmiş ayırıştırma metodu (Ruszczyński ve Świetanowski, 1997). Stokastik programlama problemleri, özel bir yapıda olduğundan ayrışım ve/veya rahatlatma yöntemleriyle çözülmektedir. Ayrışım yöntemi, esas problemi alt problemlere ayırıp, alt problemlerin çözümlerinden esas problemin çözümüne ulaşmayı içeren iteratif bir yöntemdir. Rahatlatma yöntemi ise, problemin çözümünü zorlaştıran kısıtların problemden çıkartılmasıyla başlar. Rahatlatılmış minimizasyon probleminin çözümü esas probleme bir alt sınır verir. Esas problemin herhangi uygun bir çözümü ise esas probleme bir üst sınır verir. Üst sınır ile alt sınır arasındaki göreceli farkın önceden belirlenmiş bir değerden daha küçük kalması sağlanana kadar iterasyonlar tekrarlanır (Akdemir, 2012).
2. Monte Carlo örnekleme tabanlı yaklaşık metotlar (örneklem ortalama yakınsaması) (Shapiro ve De Mello, 1998; Mak ve diğ, 1999; Shapiro ve Mello, 2001) ve stokastik ayırıştırma metodu (Higle, 2005; Zanjani ve diğ, 2007). Stokastik programlama problemlerinde senaryoların kesikli ya da sürekli dağılımla ifade edilmesi durumlarında SAA ve KTDP bize problemin yaklaşık çözümünde yardımcı olmaktadır (Branda, 2012).

4.1.5 Stokastik optimizasyon

4.1.5.1 Monolitik KTP

Gerçek hayat uygulamalarında stokastik parametrelerin senaryo olarak adlandırılan olası gerçekleşme sayısı çok yüksek sayılardadır. Stokastik programlama modellerini en basit çözme metodu stokastik modeli az sayıda senaryolu monolitik karma tamsayılı program olarak deterministik eşitlik problemi şeklinde yazıp çözmektir (Santoso, 2003). Bunun için başvurulacak yaklaşım ise rassal uzayın sınırlı sayıda senaryo ile kesikleştirilmesidir. Bu metot önerilen modelin deterministik eşitlik modeline çevrilip optimizasyon algoritmaları ile çözümüne imkan sağladığı için literatürde son zamanlarda artan bir ilgi görmektedir (Al-Qahtani ve Elkamel, 2010).

4.1.5.2 Örneklem metodu

Çok büyük sayıda senaryolu problemler, rassal veri vektörü w 'nin her bir elemanının olası değerlerinin büyük sayıda olması durumunda söz konusudur. Rassal veri vektörünün elemanları birbirinden bağımsız olduğunda toplam senaryo sayısı w 'nin her bir elemanı için olası senaryoların çarpımıdır. Bu durumda deterministik eşitlik problemi direkt monolitik karma tamsayılı program olarak pratik bir şekilde çözülemez. Hatta verilen ilk aşama çözümü y için dahi $\phi(y, w)$ fonksiyonunu çok yüksek senaryo sayısından dolayı makul bir sürede çözmek çok zordur. Bundan dolayı yaklaşık bir çözüm elde etmek için örneklem tekniklerinin kullanılmasına ihtiyaç vardır.

Örneklem teknikleri iki farklı yaklaşımla uygulanabilir. İlk yaklaşım örnekleme içsel bir süreç olarak kullanılmaktadır. Böyle algoritmalar optimizasyon problemini çözmeye çalışır ve algoritma her ne zaman yaklaşık fonksiyon değeri gerektirse örnekleme kullanır. İhtiyaç duyulan fonksiyon değeri ya da gerekli bilgi için her zaman farklı bir örneklem kümesi kullanılır. Bu hususta geliştirilen içsel örneklem teknikleri olarak, stokastik ayrıştırma yöntemi (Higle, 2005), gömülü örneklemlili stokastik metot (Infanger, 1992) ve gömülü örneklemlili dal-sınır yöntemi (Norkin ve diğ., 1998) örnek olarak gösterilebilir.

Örneklem yöntemi olarak kullanılan diğer metot dışsal örneklem yaklaşımıdır. Burada örneklem kümesi seçilir ve değer fonksiyonuna ilişkin yaklaşım bu örneklem kümesi kullanılarak yapılır. Bu metot genellikle örneklem ortalama yakınsaması

(SAA) olarak adlandırılır. SAA yönteminin geliştirilmesi Shapiro ve De Melo (1998) tarafından yapılan çalışmalarla başlamıştır. SAA modeli daha fazla örneklem yürütülmezken bir deterministik optimizasyon algoritması kullanılarak optimize edilir. Stokastik programlama için içsel örneklem metodunun aksine, SAA tekniği problemi çözerken optimizasyon algoritmasından tamamen bağımsızdır. Bağımsız örneklem tekniği ve optimizasyon algoritması tabanlı dışsal örneklem metodu paralel hesaplamalar için uygun ve uygulamada daha basit bir yöntemdir.

SAA tekniği kullanılan problem, orjinal problemten çok daha az boyutludur ve problemi çözmek daha kolaydır. Bununla beraber, SAA şeması büyük örneklem sayısı ve çözümün gerçekliği için belirli sayıda tekrar gerektirir. Yaklaşık problemin çözümü için etkin bir algoritma kullanmak gerekmektedir.

4.2 Örneklem Ortalama Yakınsaması

Stokastik programların çözümündeki temel güçlük amaç fonksiyonu beklenen değeri hesaplamaktır (Santoso ve diğ, 2005). Bu problemle ilgili güçlüğü aşmak için kullanılan yöntemlerden birisi de SAA şemasıdır. Son zamanlarda özellikle büyük ölçekli stokastik programlama problemlerinin etkin çözümü için SAA' nın hem teorik hem de sayısal uygulamalarına rastlamak mümkündür (Mak ve diğ, 1999; Santoso ve diğ, 2005; Verweij ve diğ, 2002; Schütz ve diğ., 2009; Patil ve Ukkusuri, 2011). SAA senaryo sayısı yüksek olan büyük ölçekli stokastik modellerin boyutunu düşürmek kullanılan bir metottur (Shapiro ve De Mello, 1998; Mak ve diğ, 1999; Kleywegt ve diğ, 2001).

SAA, stokastik programlamada amaç fonksiyonu beklenen değerinin bir senaryo örneklemini için problemin çözülmesi yoluyla yaklaşık olarak hesaplandığı Monte Carlo simülasyonu tabanlı bir örneklem metodudur (Patil ve Ukkusuri, 2011). Bir örneklem için çözüm süreci çok defa tekrarlanmaktadır ve en iyi çözüm seçilir. SAA örneklem sayısının artışı ile beraber gerçek probleme üssel bir hızla yakınsar (Kleywegt ve diğ, 2001; Shapiro ve De Mello, 2001).

SAA' da, rastgele vektör ξ 'nin N defa gerçekleşen bir rassal örneklemini olan $\xi^1, \dots, \xi^N$ üretilir ve beklenen $E[Q(Y, \xi)]$ değeri örneklem ortalama hesaplayıcısı $N^{-1} \sum_{n=1}^N Q(y, \xi^n)$ yoluyla hesaplanır. Senaryolar optimizasyon süreci dışında Monte Carlo örneklem metodu ile üretilmektedir. Farklı ağ yapıları için rassal faktörleri

tanımlayan dağılım fonksiyonları tanımlanır (Chouinard ve diğ, 2008). Netice olarak gerçek problem aşağıdaki modelle hesaplanabilir:

$$\min \left\{ \hat{f}_N(y) := c^T y + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q(y, \xi^n) \right\} \quad (4.20)$$

Denklem (4.20) için v_N optimal değer ve $\hat{y}_N$ optimal çözüm olsun. v_N ve $\hat{y}_N$ rassal örnekleme ile ifade edilen fonksiyonlar olduğundan mantıken rassaldırlar. Bununla beraber rassal örneklemin gerçekleşen özel bir $\xi^1, \dots, \xi^N$ için denklem 4.20 deterministiktir ve uygun optimizasyon teknikleri ile çözülebilir (Santoso ve diğ, 2005).

Örneklem sayısı N arttıkça sırasıyla optimal değer ve optimal çözüm olan v_N ve $\hat{y}_N$ bir olasılık ile gerçek problemdeki kendi mukabillerine üssel olarak yakınsar (Kleywegt ve diğ, 2001). Bu yakınsama analizi küçük sayıda örneklem içeren SAA problemi çözümünün gerçek probleme oldukça iyi bir yaklaşık çözümü sağlayacağını ileri sürmektedir. Nitekim Santoso ve diğ. (2005) stokastik modelin çok küçük örneklem sayısı kullanarak yüksek kaliteli şekilde çözüm elde edilebileceğini bu yakınsama özelliğini kullanarak göstermiştir.

Özellikle, SAA problemi optimal boşluğu $\delta \geq 0$ olacak şekilde çözülmüş ve $\varepsilon > \delta$, $\alpha \in (0,1)$ olsun. ($\hat{y}_N$ denklem (4.20) için δ - optimal çözümdür ve ε olasılık $1 - \alpha$ için optimal çözüm olsun.) SAA için örneklem büyüklüğü seçimi çözüm karmaşıklığı ve gerçeklik arasındaki ilişkiye bağlı olarak yapılmaktadır. Büyük örneklem daha gerçekçi olarak amaç fonksiyon değeri hesaplayabilmektedir. Fakat çözüm süreci büyük örneklem sayısı için daha karmaşık olmaktadır. Bunun için hem gerçekçi çözüm verecek hem de çok karmaşık olmayacak şekilde uygun örneklem sayısının belirlenmesi gerekmektedir. Bu durum ele alınacak problemin yapısına da bağlıdır. Bunun için ele alınan yöntemlerden birisi problemi ilk olarak küçük sayıda örneklem için çözüm daha sonra örneklem sayısını artırarak bu şekilde çözüm kalitesini analiz ederek en uygun noktada bırakmaktır (Patil ve Ukkusuri, 2011). O zaman örneklem büyüklüğü N aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Kleywegt ve diğ, 2001):

$$N \geq \frac{3\sigma^2}{(\varepsilon - \delta)^2} \log\left(\frac{|Y|}{\alpha}\right) \quad (4.21)$$

Burada σ_{max}^2 asıl fonksiyondan farklılığın maksimum standart sapmasıdır. Yukarıdaki denklem pratik uygulamalar için çok fazla tutucudur ve SAA çözümünü zorlaştırmaktadır. Uygulamada SAA şeması SAA probleminin bağımsız

örneklerle tekrarlı bir şekilde çözülmesini içerir. İstatistiksel güven aralıkları yaklaşık çözümün kalitesini belirlemede kullanılır (Santos ve diğ, 2005). SAA’ da alt ve üst sınırlar aday çözümlerin kalitesini belirlemekte kullanılmaktadır. Özellikle, aday çözümün ve optimal değer ile amaç değeri arasındaki fark olan optimal boşluğa karşılık gelen güven aralığı tanımlanmaktadır (Mak ve diğ, 1999). SAA süreci aşağıdaki gibidir (Kleywegt ve diğ, 2001):

Adım 1: $i:1, \dots, N$ boyutunda $j=1, \dots, M$ bağımsız örneklem kümeleri oluşturulur ve herbir küme ile ilgili problemler SAA’ da çözülür. $(\xi^1, \dots, \xi^N)$

$$\min \left\{ c^T y + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q(y, \xi_n^N) \right\} \quad (4.22)$$

v_N ve $\hat{y}_N$ sırasıyla optimal amaç fonksiyonu değeri ve örneklem $j=1, \dots, M$ için çözüm olsun.

Adım 2: Mak ve diğ. (1999) çalışmasında $E[v_N] \leq v^*$ olduğunu göstermiştir. Burada $E[v_N]$ gerçek problem optimal değerinin alt sınırıdır. Bu adımda bu alt sınırı hesaplamak için aşağıdaki hesaplayıcı kullanılır.

$$\bar{v}_{N,M} := \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v_N^j \quad (4.23)$$

Bu hesaplayıcının varyansı ise aşağıdaki varyans hesaplayıcı ile bulunur.

$$\sigma_{\bar{v}_{N,M}}^2 := \frac{1}{(M-1)M} \sum_{j=1}^M (v_N^j - \bar{v}_{N,M})^2 \quad (4.24)$$

Adım 3: Adım 1’de elde edilenler arasından uygun bir çözüm $\bar{y}$ seç. Aşağıdaki formülasyonu çözerek, N ‘den çok daha büyük olan, N' boyutunda bir örneklem ile amaç fonksiyonu değeri hesapla.

$$\tilde{f}_{N'}(\bar{y}) := c^T \bar{y} + \frac{1}{N'} \sum_{n=1}^{N'} Q(\bar{y}, \xi^n) \quad (4.25)$$

$\tilde{f}_{N'}(\bar{y})$, $f(\bar{y})$ ‘nin sapmasız bir hesaplayıcısıdır. $\bar{y}$ gerçek problem için uygun bir çözümdür ve $f(\bar{y}) \geq v^*$ ‘dir. Böylece $\tilde{f}_{N'}(\bar{y})$ değeri gerçek problem amaç fonksiyonu v^* ‘nin hesaplanan üst sınırıdır.

Bu hesaplamamanın varyansı ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\sigma_{\tilde{f}_{N'}(\bar{y})}^2 := \frac{1}{(N'-1)N'} \sum_{n=1}^{N'} (c^T \bar{y} + Q(\bar{y}, \xi^n) - \tilde{f}_{N'}(\bar{y}))^2 \quad (4.26)$$

Adım 4: $\bar{Y}$ çözümünün optimal boşluğunun değerini hesapla.

$$gap_{N,M,N'}(\bar{y}) = \bar{f}_{N'}(\bar{y}) - \bar{v}_{N,M} \quad (4.27)$$

Yukarıdaki boşluk hesaplayıcısının varyansı şu şekilde bulunur:

$$\sigma_{gap}^2 = \sigma_{N'}^2(\bar{y}) + \sigma_{\bar{v}_{N,M}}^2 \quad (4.28)$$

Hesaplanan boşluk makul değilse, örneklem büyüklüğü N test edilmelidir.

Santoso ve diğ. (2005) normal dağılımda optimal boşluk güven aralığı için aşağıdaki formülü önermektedir.

$$\bar{f}_{N'}(\bar{z}) - \bar{v}_{N,M} + z_{\alpha}(\sigma_{N'}^2(\bar{z}) + \sigma_{\bar{v}_{N,M}}^2)^{1/2} \quad (4.29)$$

SAA yaklaşımı stokastik tesis yerleşim ve ağ tasarım problemlerinin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Aydın ve Murat, 2013).

Yukarıdaki süreçten $(1-\alpha)$ güven aralığının optimal boşluğunu hesaplayabiliriz. $(n-1)$ bağımsızlık derecesinde t dağılımından elde edilen $t_{n-1,\alpha/2}$ ile aşağıdaki değerler hesaplanabilir.

$$\tilde{\varepsilon}_l = t_{n-1,\alpha/2} \frac{\sigma_{\bar{v}_N}}{\sqrt{R}} \text{ ve } \tilde{\varepsilon}_u = t_{n-1,\alpha/2} \frac{\sigma_{\bar{v}}}{\sqrt{N'}} \quad (4.30)$$

Optimalite boşluğu şu şekilde oluşturulur:

$$[0, \{\hat{v}_{N'} - \bar{v}_N\}^+ + \tilde{\varepsilon}_l + \tilde{\varepsilon}_u] \quad (4.31)$$

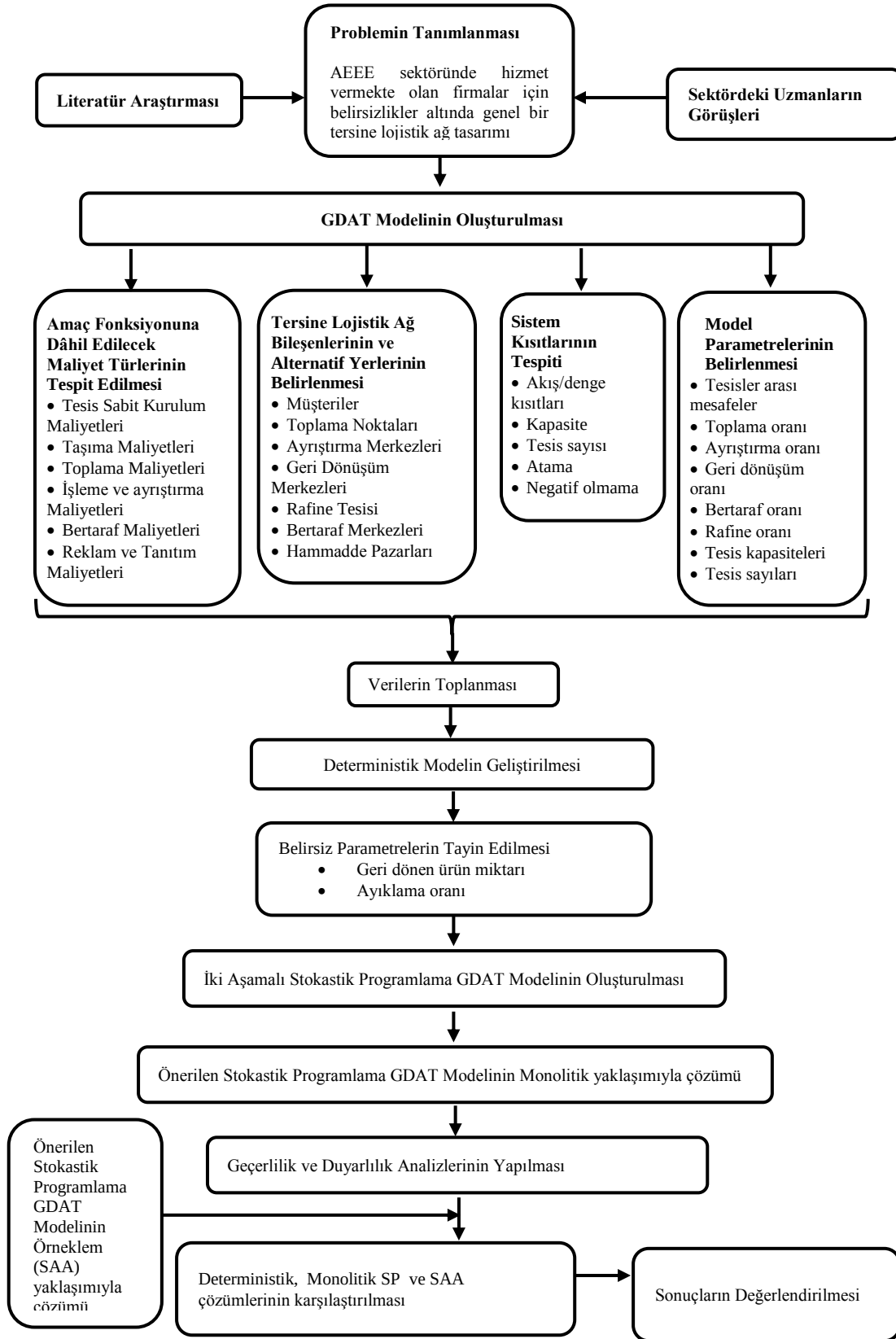
Örneklem hatasından sebebiyle $\hat{v}_{N'} < \bar{v}_N$ olabilir. Bundan dolayı denklem (4.31) vasıtasıyla elde edilen güven aralığı daha konservatif sınırlar sağlar. Bu yaklaşım Mark ve diğ. (1999) tarafından önerilmektedir.

5. TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIM METODOLOJİSİ

Özellikle son zamanlarda hızla artan rekabet ortamı neticesinde işletmeler için tedarik zinciri kavramı önemli bir rekabet avantajı sağlayan konu haline gelmiştir. Etkili bir tasarım işletmelere içinde bulundukları pazar ortamında rakiplerine karşı ciddi üstünlük sağlama fırsatı vermektedir. Bununla Dünya’da doğal kaynakların hızla tükenmeye başlaması, sanayi ürünleri bazlı çevre sorunlarının hızla artması işletmeleri çevresel açıdan da sorumlu hale getirmiştir. Bu durumda kanuni yönetmelikler, ekonomik ve sosyal faktörlerin etkisi ile firmalar ürettikleri ürünlerin geri kazanımını tedarik zincirlerine entegre etmek zorunda kalmışlardır. Tedarik zincirine eklenmek durumunda olan geri kazanım faaliyetleri yukarıdaki bölümlerde açıklanan üretim dönüşleri, dağıtım dönüşleri, müşteri dönüşleri gibi sebeplerden dolayı üretilen ürünlerin geri toplanması, toplama noktaları ile işleme tesisleri arasında taşınması, geri kazanım faaliyetleri, bertaraf faaliyetleri, yeniden üretim ya da pazara sürülmesi gibi bir takım kritik süreçleri içermektedir. Nasıl ki işletmeler için tedarik zinciri tasarım kararları yüksek stratejik önem içeren kararlar ise tersine lojistik kararları da taktik ve stratejik kararları bünyesinde barındıran önemli kararlardır.

TLAT konusu son yıllardaki önemine binaen son derece kritik bir süreç haline gelmiştir. Müşterilerden kullanım ömrü bitmiş, garanti kapsamındaki ürünlerin vb. hangi şekillerde toplanacağı, toplama noktalarının nerelerde ve hangi kapasite ve sayıda açılması gerektiği, geri kazanım seçeneğinin tespit edilmesi, geri kazanım sürecinde kullanılacak teknolojinin seçimi, ürün bertarafının nerede yapılacağı, araç rotalarının belirlenmesi, tesis kapasitelerinin belirlenmesi, tesisler arası taşıma miktarları vb. hususlar TL ağı faaliyete geçmeden önce üzerinde dikkatlice düşünülmesi gereken konulardır.

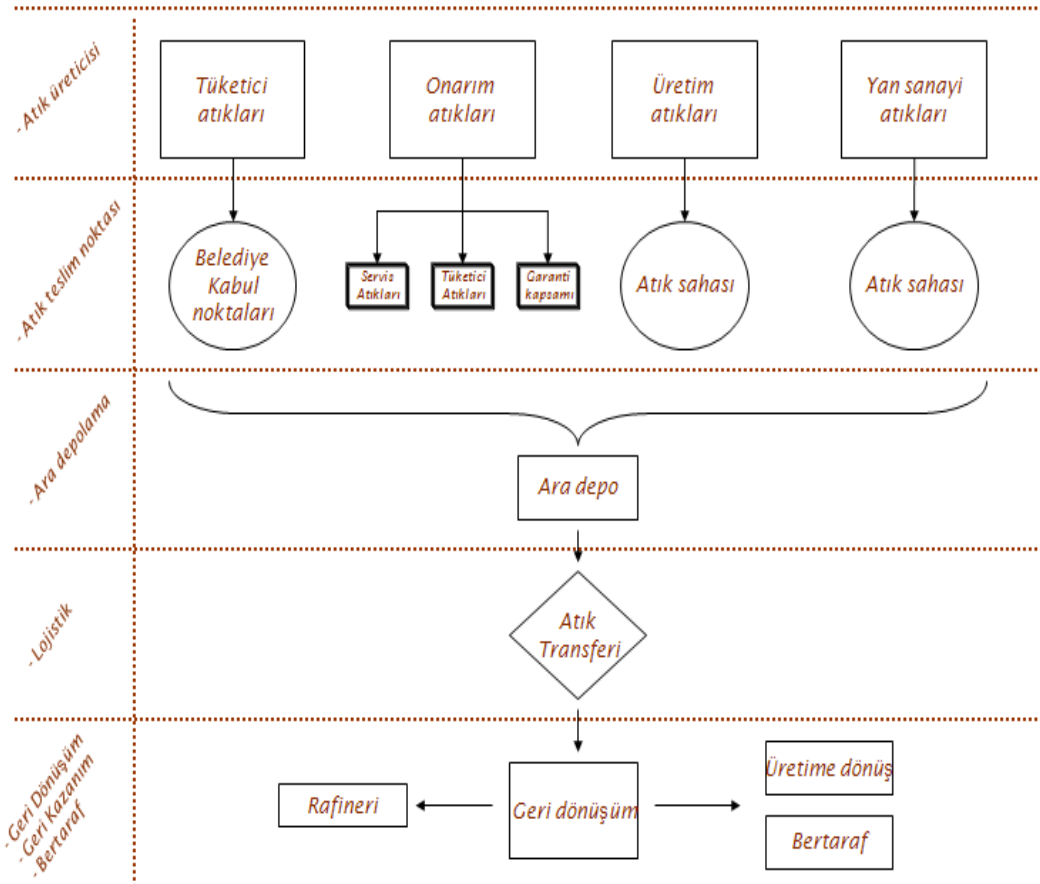
Bu tez çalışması kapsamında TL faaliyetlerinden biri olan geri dönüşüm sürecini baz alan bir GDAT problemi ele alınmıştır. Bu bölümde ele alınan problem için bir metodoloji öne sürülecektir. Şekil 5.1’de tez kapsamında ele alınan problemin çözümü için izlenen süreç görülmektedir.



Şekil 5.1: GDAT problemi akış şeması.

5.1 Önerilen GDAT Modelinin Yapısı

Bu çalışmada ele alınan problem geri dönen ürün miktarı ve kalitesi belirsizlikleri altında, açık döngü, çok aşamalı, çok ürünlü, kapasite kısıtlı GDAT problemidir. Bu problem için ilk olarak ağdaki tüm parametrelerin belirli olduğu varsayımı ile deterministik bir KTDP modeli önerilmiştir. İkinci aşamada ise geri dönen ürün miktar ve kalitesi parametreleri gerçek hayat koşullarına uygun olarak belirsiz olarak alınıp önerilen deterministik model genişletilmek suretiyle GDAT problemi için iki aşamalı stokastik programlama modeli geliştirilmiştir. Burada ele alınan geri kazanım opsiyonu geri dönüşüm sürecidir. Bir başka deyişle ele alınan problem geri dönüşüm ağ tasarımı problemidir. Geri dönüşüm süreci şekil 5.2’de görüldüğü gibi işlemektedir.

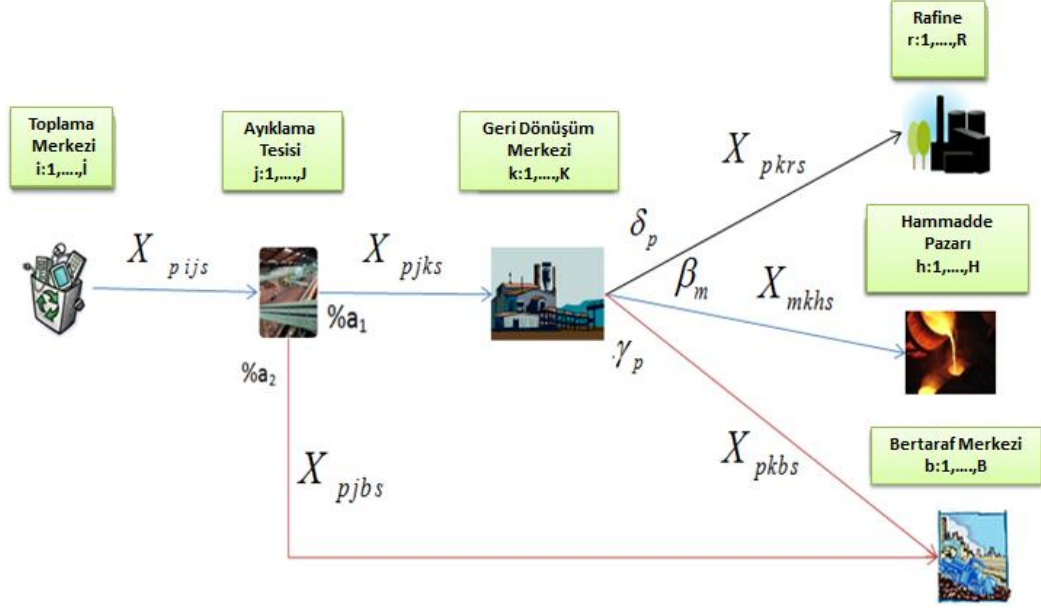


Şekil 5.2: AEEE geri dönüşüm süreci.

Önerilen model dağıtıcılar, belediyeler, üreticiler ve son kullanıcılardan oluşan müşteriler, toplama noktaları (TM), ayıklama tesisleri (AT), geri dönüşüm merkezleri (GDM), bertaraf merkezleri (BM), rafineri merkezi (RM) ve hammadde pazarlarından (HP) oluşmaktadır. Müşterilerden garanti dönüşü, son kullanma süresi,

geri iade vs. sebeplerle geri dönen ürünler belediye, üretici ve dağıtıcıların belirledikleri yerlerde konuşlandırılan ve toplama noktası adı verilen konteynerlerde toplanmaktadır. TM'lerde ürüne dair herhangi bir işleme yapılmayan ve sadece toplama amaçlı noktalardır. TM'lerin konuşlandırıldıkları yerler için herhangi bir ücret ödenmemektedir. TM'lerde toplanan ürünler belirli periyotlarla üçüncü parti geri dönüşüm firmasına ait özel lisanslı atık taşıma araçları ile alınmakta ve bu atıklar AT'lere gelmektedir. Ayıklama tesisleri hem merkezi toplama noktası olarak hem de geri dönüşüm işlemi öncesinde atıkların kalitesine göre bir ayıklamasının yapıldığı tesisler olarak kullanılmaktadır. Ürünlerin ayıklaması belirli bir maliyet ve zaman gerektirmektedir. Burada ürünler ayıklama işlemine tabi tutulmakta ve bir kısım ürün bertaraf merkezlerine gönderilerek kontrollü olarak imha edilmekte, bir kısım ürün ise geri dönüşüm tesislerinde geri dönüşüm işlemine tabi tutulmaktadır. Geri dönüşüm işleminde atık ürünlerden çıkan tehlikeli atık, işleme lisansı olmayan ürünler, işletme için getirisi olmayan ürünler dışında kalan ürünlerden geri dönüşüm işlemine tabi tutularak şekilde gösterilen malzemeler elde edilmekte ve bunlar satılmak üzere hammadde pazarlarına gönderilmektedir. Yine geri dönüşüm tesislerinde dönüştürülemeyen atıklar için iki alternatif bulunmaktadır. Bunlardan birincisi bu atıkların bertaraf tesislerine gönderilmesi, ikincisi ise değerli atık olup da (altın gibi) işleme lisansı olmayan ürünlerin lisanslı rafine tesislerine satılmasıdır. Hem AT'lerden hem de GDM'lerden bertarafa gönderilen ürünler için belirli bir imha maliyeti söz konusudur. Hammadde pazarına satılan ürünlerden ise bir gelir elde edilmektedir. Şekil 5.3 geri dönüşüm sürecini ayrıntılı bir şekilde göstermektedir.

TL ağı için toplam ağ maliyeti maliyet kalemlerini içermektedir: Ürünlerin müşterilerden toplanması aşamasında ortaya çıkan e-atık satın alma ve toplanan atıkları toplama merkezlerine taşıma maliyetlerinin toplamından oluşan toplama maliyeti; TM, AT, GDM, BM, RM ve HP arasında ürün taşıma maliyetleri, AT ve GDM'lerdeki atık ayıklama ve işleme maliyetleri, tehlikeli ve dönüştürülemeyen atıkların BM'lerde yok edilme maliyetleri, kullanıcılardan daha çok e-atık toplanması amacıyla broşür, poster ve reklam için harcanan reklam ve bilinçlendirme maliyeti ile AT ve GDM'lerin sabit kurulum maliyetlerinden oluşmaktadır.



Şekil 5.3: Geri dönüşüm ağı genel yapısı.

Çalışma kapsamında müşterilerden toplanan ürünlerin ayıklama işlemi için sevk edileceği AT'leri için farklı alternatifler bulunmaktadır.

5.2 Modelin Varsayımları

Önerilen modelde aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir:

- Müşterilerden toplama merkezlerine gelen tüm e-atıklar geri dönüşüm tesislerine gönderilmektedir.
- Envanter maliyetleri ihmal edilmiştir.
- Ele alınan model tek periyotludur.
- Toplama, ayıklama ve geri dönüşüm tesislerinde güvenlik stoku bulunmamaktadır.
- Ayıklama ve geri dönüşüm tesisleri kısıtlı kapasiteye sahiptir.
- Ağdaki tüm maliyetler ve ürün işleme- bertaraf oranları bilinmektedir.

- Toplama konteynerlerinin yer ve kapasiteleri bilinmektedir.
- Toplama, ayıklama ve geri dönüşüm tesislerinin potansiyel yer ve sayıları bilinmektedir.
- Önerilen modellerin uygulamasında AEEE yönetmeliğine göre on adet ürün grubu şeklinde gruplandırılan e-atıklar çalışmanın uygulama bölümünde ele alınan firmanın geri dönüşüm lisansları göz önüne alınarak dört grup altında toplanmıştır.
- Çalışmada tesisler arası taşımalarda konteynerlerin dolu olduğu varsayılmıştır.
- Çalışmada ele belirsiz olarak ele alınan kalite ve miktar belirsizliklerinin birbirinden bağımsız oldukları varsayılmıştır.
- Önerilen stokastik programlama modellerinde belirsiz parametreler için üretilen senaryoların gerçekleşme olasılıkları eşit olarak alınmıştır.
- Tesisler arası atık ürün taşımalarının sadece lisanslı araçlarla yapılmaktadır ve taşımalarda sadece karayolu kullanılmaktadır.

5.3 Önerilen Deterministik GDAT Modelinin Formülasyonu

İndeksler

i: Potansiyel Toplama Merkezi (TM) İndeksi	$i \in I = \{1, \dots, N_i\}$
j: Potansiyel Ayıklama Tesisi (AT) İndeksi	$j \in J = \{1, \dots, N_j\}$
k: Potansiyel Geri Dönüşüm Merkezi (GDM) İndeksi	$k \in K = \{1, \dots, N_k\}$
b: Potansiyel Bertaraf Merkezi (BM) İndeksi	$b \in B = \{1, \dots, N_b\}$
r: Potansiyel Rafine Merkezi (RM) İndeksi	$r \in R = \{1, \dots, N_r\}$
h: Potansiyel Hammadde Pazarı (HP) İndeksi	$h \in H = \{1, \dots, N_h\}$
p: Ürün İndeksi	$p \in P = \{1, \dots, N_p\}$
m: Parça İndeksi	$m \in M = \{1, \dots, N_m\}$

Parametreler

Tesis açılış maliyetleri

- e_i : i. TM'nin sabit kurulum maliyeti
 f_j : j. AT'nin sabit kurulum maliyeti
 g_k : k. GDM'nin sabit kurulum maliyeti

Taşıma maliyetleri

tci_{pjj} : p. ürünün i. TM'den j. AT'ye taşıma maliyeti

tir_{pjk} : p. ürünün j. AT'den k. GDM'ye taşıma maliyeti

tid_{pjb} : p. ürünün j. AT'den b. BM' ye taşıma maliyeti

trr_{pkr} : p. ürünün k. GDM' den r. RM' ne taşıma maliyeti

trm_{mkh} : m. malzemenin k. GDM'den h. HP pazarına taşıma maliyeti

trd_{pkb} : p. ürünün k. GDM'den b. BM' ye taşıma maliyeti

Yeniden İşleme ve Toplama Maliyetleri

cc_{pi} : Ürün p'nin i. TM'de birim toplama maliyeti

ic_{pk} : Ürün p'nin j. AT'de birim ön işleme maliyeti

rc_{pk} : Ürün p'nin k. GDM'de birim geri dönüşüm maliyeti

dc_{pb} : Ürün p'nin b. BM' de birim bertaraf maliyeti

AC: Bilinçlendirme ve tanıtım maliyeti

Kapasite Parametreleri

$KATmin_{jp}$: j. AT'nin maksimum kapasitesi (ton)

$KATmin_{jp}$: j. AT'nin minimum kapasitesi (ton)

$KGDMmax_{kp}$: k. GDM'nin maksimum kapasitesi k (ton)

$KGDMmin_{kp}$: k. GDM'nin minimum kapasitesi k (ton)

Tesisler Arası Mesafeler

dci_{ij} : i. TM ile j. AT arası mesafe (km)

dir_{jk} : j. AT ile k. GDM arası mesafe (km)

did_{jb} : j. AT ile b. BM arası mesafe (km)

drd_{kb} : k. GDM ile b. BM arası mesafe (km)

drm_{kh} : k. GDM ile h. HP arası mesafe (km)

drd_{kr} : k. GDM ile r. RM arası mesafe (km)

Tesis Sayıları

SAT_j^{max} : Maksimum AT sayısı

$SGDM_k^{max}$: Maksimum GDM sayısı

SAT_j^{min} : Minimum AT sayısı

$SGDM_k^{min}$: Minimum GDM sayısı

Diğer Parametreler

β_m : m. malzemenin GDM’de geri dönüşüm oranı

γ_p : GDM ‘den bertaraf merkezine gönderilen ürün p oranı

δ_p : GDM ‘den rafine merkezine gönderilen ürün p oranı

r_{ip} : i. toplama merkezine gelen yıllık atık ürün p miktarı (Belirsiz)

a_p : AT’de ürün p için GDM’ye gönderilmeye değer ürün oranı

R_{pm} : Herbir ürün gurubunda bulunan malzeme oranları

M: Çok büyük bir sayı

Karar Değişkenleri

X_{pij}^{ci} : i. TM’den j. AT ’e taşınan ürün p miktarı

X_{pjk}^{ir} : j. AT’den k. GDM’ye taşınan ürün p miktarı

X_{pjb}^{id} : j. AT’den b. BM’ne taşınan ürün p miktarı

X_{pkr}^{rr} : k. GDM’den r. RM’e taşınan ürün p miktarı

X_{mkh}^{rm} : k. GDM’den h. HP pazarına taşınan malzeme m miktarı

X_{pkb}^{rd} : k. GDM’den b. BM’ne taşınan ürün p miktarı

W_i : i. TM’nin açılıp açılmaması (0,1)

Y_j : j. AT’nin açılıp açılmaması (0,1)

Z_k : k. GDM’nin açılıp açılmaması (0,1)

V_{ij} : i. TM’nin j. AT’ye atanıp atanmaması (0,1)

Amaç Fonksiyonu: Maliyet Minimizasyonu

Toplam Maliyet = Tesis Sabit Kurulum Maliyetleri+ Ürün Taşıma Maliyetleri +
TM’de Ürün Toplama Maliyeti + AT’de Ayıklama Maliyeti + GDM’de Geri
Dönüşüm Maliyeti + Ürün Bertaraf Maliyeti+ Reklam Maliyeti

$$\begin{aligned} & (\sum_i W_i \cdot e_i + \sum_j Y_j \cdot f_j + \sum_k Z_k \cdot g_k \text{ (Tesis Sabit Kurulum Maliyetleri)} \\ & + (\sum_p \sum_i \sum_j X_{pij}^{ci} \cdot tci_{pij} \cdot dci_{ij} + \sum_p \sum_j \sum_k X_{pjk}^{ir} \cdot tir_{pjk} \cdot dir_{jk} + \\ & \sum_p \sum_j \sum_b X_{pjb}^{id} \cdot tid_{pjb} \cdot did_{jb} + \sum_p \sum_k \sum_r X_{pkr}^{rr} \cdot trr_{pkr} \cdot drr_{kr} + \\ & \sum_m \sum_k \sum_h X_{mkh}^{rm} \cdot trm_{mkh} \cdot drm_{kh} + \sum_p \sum_k \sum_b X_{pkb}^{rd} \cdot trd_{pkb} \cdot drd_{kb} \text{ (Ürün Taşıma} \\ & \text{Maliyetleri)} + \\ & \sum_p \sum_i \sum_j X_{pij}^{ci} \cdot cc_{pi} \text{ (TM’de Ürün Toplama Maliyeti)} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_p \sum_i \sum_j X_{pij}^{ci} \cdot ic_{pi} (\text{AT'de Ayıklama Maliyeti}) + \\
& \sum_p \sum_j \sum_k X_{pjk}^{ir} \cdot rc_{pk} (\text{GDM'de Geri Dönüşüm Maliyeti}) + \\
& \sum_p \sum_j \sum_b X_{pjb}^{id} \cdot dc_{pb} + \sum_p \sum_k \sum_b X_{pkb}^{rd} \cdot dc_{pb} \quad (\text{Bertaraf Maliyetleri}) + \\
& AC (\text{Reklam Maliyeti})
\end{aligned} \tag{5.1}$$

Kısıtlar

Denge Kısıtları

$$X_{pij}^{ci} = r_{pi} \cdot V_{ij} \quad (\forall p \in P, \forall i \in I, \forall j \in J) \tag{5.2}$$

$$\sum_k X_{pjk}^{ir} = \sum_i X_{pij}^{ci} \cdot a_p \quad (\forall p \in P, \forall k \in K) \tag{5.3}$$

$$\sum_b X_{pjb}^{id} = \sum_i X_{pij}^{ci} \cdot (1 - a_p) \quad (\forall p \in P, \forall j \in J) \tag{5.4}$$

$$\sum_h X_{mkh}^{rm} = \sum_j \sum_p X_{pjk}^{ir} \cdot R_{pm} \cdot \beta_m \quad (\forall m \in M, \forall k \in K) \tag{5.5}$$

$$\sum_b X_{pkb}^{rd} = \sum_j X_{pjk}^{ir} \cdot \gamma_p \quad (\forall p \in P, \forall k \in K) \tag{5.6}$$

$$\sum_r X_{pkr}^{rr} = \sum_j X_{pjk}^{ir} \cdot \delta_p \quad (\forall p \in P, \forall k \in K) \tag{5.7}$$

$$\sum_i X_{pij}^{ci} \leq KAT_{max_{jp}} \cdot Y_j \quad (\forall p \in P, \forall j \in J) \tag{5.8}$$

$$\sum_i \sum_p X_{pij}^{ci} \geq KAT_{min_{jp}} \cdot Y_j \quad (\forall j \in J) \tag{5.9}$$

$$\sum_j X_{pjk}^{ir} \leq KGDM_{max_{kp}} \cdot Z_k \quad (\forall p \in P, \forall k \in K) \tag{5.10}$$

$$\sum_j \sum_p X_{pjk}^{ir} \geq KGDM_{min_{kp}} \cdot Z_k \quad (\forall k \in K) \tag{5.11}$$

$$\sum_j V_{ij} = 1 \quad (\forall i \in I) \tag{5.12}$$

$$\sum_p \sum_i X_{pij}^{ci} \leq M \cdot Y_j \quad (\forall j \in J) \tag{5.13}$$

$$\sum_p \sum_j X_{pjk}^{ci} \leq M \cdot Y_k \quad (\forall k \in K) \tag{5.14}$$

$$\sum_j Y_j \leq SAT_j^{max} \tag{5.15}$$

$$\sum_j Y_j \geq SAT_j^{min} \tag{5.16}$$

$$\sum_k Z_k \leq SGDM_k^{max} \tag{5.17}$$

$$\sum_k Z_k \geq SGDM_k^{min} \tag{5.18}$$

$$X_{pij}^{ci}, X_{pjk}^{ir}, X_{pjb}^{id}, X_{mkh}^{rm}, X_{pkb}^{rd}, X_{pkr}^{rr} \geq 0 \text{ ve } W_i, Y_j, Z_k, V_{ij} \in (0,1) \tag{5.19}$$

Denklem (5.1) tesis sabit kurulum maliyetleri, ürün taşıma maliyetleri, TM'de ürün toplama maliyeti, AT'de ayıklama maliyeti, GDM 'de geri dönüşüm maliyeti, BM'de ürün bertaraf maliyetleri ve tanıtım- bilinçlendirme maliyetleri toplamından oluşan toplam maliyetlerin minimizasyonu. (5.2) Müşterilerden toplanan kullanılmış ürün miktarının TM'lerden AT'ye gönderilen miktara eşit olması (5.3) AT'den geri dönüşüm merkezine gönderilen ürün p miktarının toplama merkezinden AT'ye gelen

miktar ile AT' deki ön işleme oranının çarpından küçük ve eşit olması kısıtı, (5.4) AT'den geri dönüşüm merkezine gönderilen ürün p miktarının toplama merkezinden AT'ye gelen miktar ile AT' deki bertarafa gönderilme oranının çarpından küçük ve eşit olması kısıtı, (5.5) Geri dönüşüm merkezinden hammadde pazarına giden miktarın AT'lerden geri dönüşüm merkezine gönderilen miktara eşit ya da küçük olması kısıtı, (5.6) Geri dönüşüm merkezinden bertaraf merkezlerine gönderilen atık malzeme miktarının AT'lerden geri dönüşüm merkezine gönderilen ürün p miktara eşit ya da küçük olması kısıtı, (5.7) Geri dönüşüm merkezinden rafine merkezlerine gönderilen atık malzeme miktarının AT'lerden geri dönüşüm merkezine gönderilen miktara eşit ya da küçük olması kısıtı, (5.8, 5.9) AT'ye gelen ürün miktarının AT kapasitesine sırası ile atında ve üzerinde olmaması kısıtı, (5.10,5.11) GDM'ye gelen ürün miktarının GDM kapasitesine sırası ile atında ve üzerinde olmaması kısıtı, (5.12) Toplama merkezinin sadece bir AT'ye bağlanması, (5.13,5.14) sırasıyla her bir AT ve GDM'ye tesisin açılması durumunda ürün atanması, (5.15,5.16) Açılabilir olan AT'lerin maksimum ve minimum sayılarını gösteren kısıt, (5.17,5.18) Açılabilir olan GDM'lerin maksimum ve minimum sayılarını gösteren kısıt, (5.19) tamsayı ve negatif olmama kısıtları.

5.4 Önerilen İki Aşamalı Stokastik GDAT Modelinin Formülasyonu

Bir önceki bölümde sunulan karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli tersine lojistik ağ yapısının tabiatında mevcut olan miktar ve kalite parametreleri belirsiz olarak alınmak suretiyle genişletilerek belirsizlikler altında GDAT problemi elde edilmiştir. Bu problemin etkin bir şekilde çözülebilmesi için de iki aşamalı stokastik programlama modeli önerilmiştir.

İndeksler

i: Potansiyel Toplama Merkezi (TM) İndeksi	$i \in I = \{1, \dots, N_i\}$
j: Potansiyel Ayıklama Tesisi (AT) İndeksi	$j \in J = \{1, \dots, N_j\}$
k: Potansiyel Geri Dönüşüm Merkezi (GDM) İndeksi	$k \in K = \{1, \dots, N_k\}$
b: Potansiyel Bertaraf Merkezi (BM) İndeksi	$b \in B = \{1, \dots, N_b\}$
r: Potansiyel Rafine Merkezi (RM) İndeksi	$r \in R = \{1, \dots, N_r\}$
h: Potansiyel Hammadde Pazarı (HP) İndeksi	$h \in H = \{1, \dots, N_h\}$
p: Ürün İndeksi	$p \in P = \{1, \dots, N_p\}$

m: Parça İndeksi

$m \in M = \{1, \dots, N_m\}$

s: Senaryo

$s \in S = \{1, \dots, N_s\}$

Parametreler

Tesis açılış maliyetleri

e_i : i. TM'nin sabit kurulum maliyeti

f_j : j. AT'nin sabit kurulum maliyeti

g_k : k. GDM'nin sabit kurulum maliyeti

Taşıma maliyetleri

tc_{ipj} : p. ürünün i. TM'den j. AT'ye taşıma maliyeti

tr_{pjk} : p. ürünün j. AT'den k. GDM'ye taşıma maliyeti

td_{pjb} : p. ürünün j. AT'den b. BM' ye taşıma maliyeti

trr_{pkr} : p. ürünün k. GDM'den r. RM' ne taşıma maliyeti

trm_{mkh} : m. malzemenin k. GDM'den h. HP 'ye taşıma maliyeti

trd_{pkb} : p. ürünün k. GDM'den b. BM' ye taşıma maliyeti

Yeniden İşleme ve Toplama Maliyetleri

cc_{pi} : Ürün p'nin i. TM'de birim toplama maliyeti

ic_{pk} : Ürün p'nin j. AT'de birim ön işleme maliyeti

rc_{pk} : Ürün p'nin k. GDM'de birim geri dönüşüm maliyeti

dc_{pb} : Ürün p'nin b. BM' de birim bertaraf maliyeti

AC: Bilinçlendirme ve tanıtım maliyeti

Kapasite Parametreleri

$KATmin_{jp}$: j. AT'nin maksimum kapasitesi (ton)

$KATmin_{jp}$: j. AT'nin minimum kapasitesi (ton)

$KGDMmax_{kp}$: k. GDM'nin maksimum kapasitesi k (ton)

$KGDMmin_{kp}$: k. GDM'nin minimum kapasitesi k (ton)

Tesisler Arası Mesafeler

dci_{ij} : i. TM ile j. AT arası mesafe (km)

dir_{jk} : j. AT ile k. GDM arası mesafe (km)

did_{jb} : j. AT ile b. BM arası mesafe (km)

drd_{kb} : k. GDM ile b. BM arası mesafe (km)

drm_{kh} : k. GDM ile h. HP pazarı arası mesafe (km)

drr_{kr} : k. GDM ile r. RM arası mesafe (km)

Tesis Sayıları

SAT_j^{max} : Maksimum AT sayısı

$SGDM_k^{max}$: Maksimum GDM sayısı

SAT_j^{min} : Minimum AT sayısı

$SGDM_k^{min}$: Minimum GDM sayısı

Diğer Parametreler

β_m : m. malzemenin GDM’de geri dönüşüm oranı

γ_p : GDM ‘den bertaraf merkezine gönderilen ürün p oranı

δ_p : GDM ‘den rafine merkezine gönderilen ürün p oranı

r_{ips} : s senaryosuna göre i. toplama merkezine gelen yıllık atık ürün p miktarı

a_{ps} : s senaryosuna AT’de ürün p için GDM’ye gönderilmeye değer ürün p oranı

R_{pm} : Herbir ürün gurubunda bulunan malzeme oranları

π_s : Senaryo s’nin gerçekleşme olasılığı

M: Çok büyük bir sayı

Karar Değişkenleri

X_{pijs}^{ci} : Senaryo s’de i. TM’den j. AT’ye taşınan ürün p miktarı

X_{pjks}^{ir} : Senaryo s’de j. AT’den k. GDM’ye taşınan ürün p miktarı

X_{pjbs}^{id} : Senaryo s’de j. AT’den b. BM’ne taşınan ürün p miktarı

X_{pkrs}^{rr} : Senaryo s’de k. GDM’den r. RM’e taşınan ürün p miktarı

X_{mkhs}^{rm} : Senaryo s’de k. GDM’den h. HP’ye taşınan malzeme m miktarı

X_{pkbs}^{rd} : Senaryo s’de k. GDM’den b. BM’ne taşınan ürün p miktarı

W_i : i. TM’nin açılıp açılmaması (0,1)

Y_j : j. AT’nin açılıp açılmaması (0,1)

Z_k : k. GDM’nin açılıp açılmaması (0,1)

V_{ij} : i. TM’nin j. AT’ye atanıp atanmaması (0,1)

Amaç Fonksiyonu: Maliyet Minimizasyonu

Toplam Maliyet = Tesis Sabit Kurulum Maliyetleri+ Ürün Taşıma Maliyetleri +
TM’de Ürün Toplama Maliyeti + AT’de Ayıklama Maliyeti + GDM’de Geri
Dönüşüm Maliyeti + Ürün Bertaraf Maliyeti+ Reklam Maliyeti

$$\begin{aligned}
 & \sum_i W_i \cdot e_i + \sum_j Y_j \cdot f_j + \sum_k Z_k \cdot g_k \quad (\text{Tesis Sabit Kurulum Maliyetleri}) + \\
 & \pi_s \cdot (\sum_p \sum_i \sum_j \sum_s X_{pijs}^{ci} \cdot tci_{pij} \cdot dci_{ij} + \sum_p \sum_j \sum_k \sum_s X_{pjks}^{ir} \cdot tir_{pjks} \cdot dir_{jk} + \\
 & \sum_p \sum_j \sum_b \sum_s X_{pjbs}^{id} \cdot tid_{pjbs} \cdot did_{jb} + \sum_p \sum_k \sum_r \sum_s X_{pkrs}^{rr} \cdot trr_{pkrs} \cdot drr_{kr} + \\
 & \sum_m \sum_k \sum_h \sum_s X_{mkhs}^{rm} \cdot trm_{mkhs} \cdot drm_{kh} + \sum_p \sum_k \sum_b \sum_s X_{pkbs}^{rd} \cdot trd_{pkbs} \cdot drd_{kb} \\
 & \quad (\text{Taşıma Maliyetleri}) + \\
 & \sum_p \sum_i \sum_j \sum_s X_{pijs}^{ci} \cdot cc_{pi} \quad (\text{Toplama Maliyeti}) + \\
 & \sum_p \sum_i \sum_j \sum_s X_{pijs}^{ci} \cdot ic_{pi} \quad (\text{Ayıklama Maliyeti}) + \\
 & \sum_p \sum_j \sum_k \sum_s X_{pjks}^{ir} \cdot rc_{pk} \quad (\text{Geridönüşüm maliyeti}) + \\
 & \sum_p \sum_j \sum_b \sum_s X_{pjbs}^{id} \cdot dc_{pb} + \sum_p \sum_k \sum_b \sum_s X_{pkbs}^{rd} \cdot dc_{pb} \quad (\text{Bertaraf maliyeti}) \\
 & + AC \quad (\text{Reklam ve tanıtım maliyeti}) \tag{5.20}
 \end{aligned}$$

Kısıtlar

$$X_{pijs}^{ci} = r_{psi} \cdot V_{ij} \quad (\forall p \in P, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in S) \tag{5.21}$$

$$\sum_k X_{pjks}^{ir} = \sum_i X_{pijs}^{ci} \cdot a_{ps} \quad (\forall p \in P, \forall j \in J, \forall s \in S) \tag{5.22}$$

$$\sum_b X_{pjbs}^{id} = \sum_i X_{pijs}^{ci} \cdot (1 - a_{ps}) \quad (\forall p \in P, \forall j \in J, \forall s \in S) \tag{5.23}$$

$$\sum_h X_{mkhs}^{rm} = \sum_j \sum_p X_{pjks}^{ir} \cdot R_{pm} \cdot \beta_m \quad (\forall m \in M, \forall k \in K, \forall s \in S) \tag{5.24}$$

$$\sum_b X_{pkbs}^{rd} = \sum_j X_{pjks}^{ir} \cdot \gamma_p \quad (\forall p \in P, \forall k \in K, \forall s \in S) \tag{5.25}$$

$$\sum_r X_{pkrs}^{rr} = \sum_j X_{pjks}^{ir} \cdot \delta_p \quad (\forall p \in P, \forall k \in K, \forall s \in S) \tag{5.26}$$

$$\sum_i X_{pijs}^{ci} \leq KAT_{max_{jp}} \cdot Y_j \quad (\forall p \in P, \forall j \in J, \forall s \in S) \tag{5.27}$$

$$\sum_i X_{pijs}^{ci} \geq KAT_{min_{jp}} \cdot Y_j \quad (\forall p \in P, \forall j \in J, \forall s \in S) \tag{5.28}$$

$$\sum_j X_{pjks}^{ir} \leq KGDM_{max_{kp}} \cdot Z_k \quad (\forall p \in P, \forall k \in K, \forall s \in S) \tag{5.29}$$

$$\sum_j X_{pjks}^{ir} \geq KGDM_{min_{kp}} \cdot Z_k \quad (\forall p \in P, \forall k \in K, \forall s \in S) \tag{5.30}$$

$$\sum_j V_{ij} = 1 \quad (\forall i \in I) \tag{5.31}$$

$$\sum_p \sum_i X_{pijs}^{ci} \leq M \cdot Y_j \quad (\forall j \in J, \forall s \in S) \tag{5.32}$$

$$\sum_p \sum_j X_{pjks}^{ir} \leq M \cdot Y_k \quad (\forall k \in K, \forall s \in S) \tag{5.33}$$

$$\sum_j Y_j \leq SAT_j^{max} \tag{5.34}$$

$$\sum_j Y_j \geq SAT_j^{\min} \quad (5.35)$$

$$\sum_k Z_k \leq SGDM_k^{\max} \quad (5.36)$$

$$\sum_k Z_k \geq SGDM_k^{\min} \quad (5.37)$$

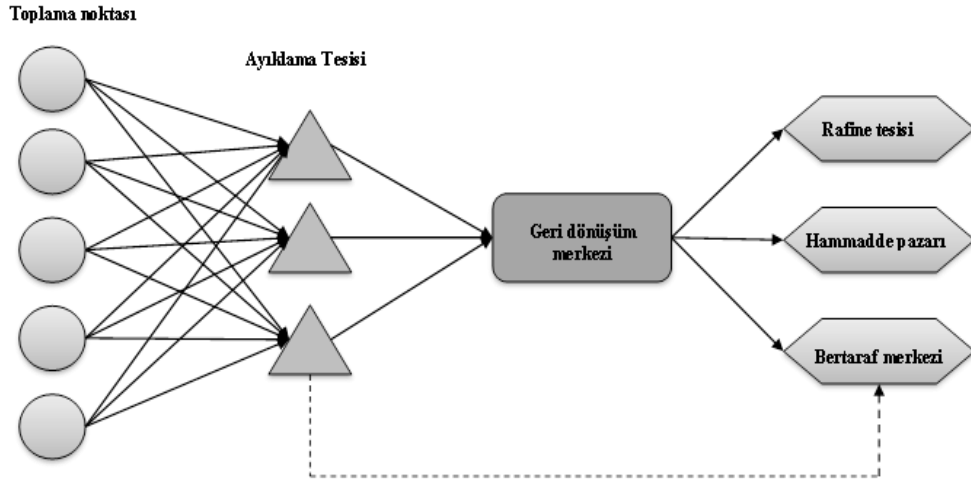
$$X_{pijs}^{ci}, X_{pjks}^{ir}, X_{pjbs}^{id}, X_{mkhs}^{rm}, X_{pkbs}^{rd}, X_{pkrs}^{rr} \geq 0 \text{ ve } W_i, Y_j, Z_k, V_{ij} \in (0,1) \quad (5.38)$$

(5.20) Tesis sabit kurulum maliyetleri, ürün taşıma maliyetleri, TM’de ürün toplama maliyeti, AT’de ayıklama maliyeti, GDM’de geri dönüşüm maliyeti, BM’de ürün bertaraf maliyetleri ve tanıtım- bilinçlendirme maliyetleri toplamından oluşan toplam maliyetlerin minimizasyonu. (5.21) herbir senaryoda müşterilerden toplanan kullanılmış ürün miktarının TM’lerden AT’ye gönderilen miktara eşit olması (5.22) herbir senaryoda AT’den geri dönüşüm merkezine gönderilen ürün p miktarının toplama merkezinden AT’ye gelen miktar ile AT’ deki ayıklama oranının çarpından küçük ve eşit olması kısıtı, (5.23) herbir senaryoda AT’den geri dönüşüm merkezine gönderilen ürün p miktarının toplama merkezinden AT’ye gelen miktar ile AT’ deki bertarafa gönderilme oranının çarpından küçük ve eşit olması kısıtı, (5.24) herbir senaryoda geri dönüşüm merkezinden hammadde pazarına giden miktarın AT’ lerden geri dönüşüm merkezine gönderilen miktara eşit ya da küçük olması kısıtı, (5.25) herbir senaryoda geri dönüşüm merkezinden bertaraf merkezlerine gönderilen atık malzeme miktarının AT’ lerden geri dönüşüm merkezine gönderilen ürün p miktara eşit ya da küçük olması kısıtı, (5.26) herbir senaryoda geri dönüşüm merkezinden rafine merkezlerine gönderilen atık malzeme miktarının AT’ lerden geri dönüşüm merkezine gönderilen miktara eşit ya da küçük olması kısıtı, (5.27,5.28) herbir senaryoda AT’ye gelen ürün miktarının AT kapasitesine sırası ile atında ve üzerinde olmaması kısıtı, (5.23,5.30) herbir senaryoda GDM’ye gelen ürün miktarının GDM kapasitesine sırası ile atında ve üzerinde olmaması kısıtı, (5.31) toplama merkezinin sadece bir AT’ye bağlanması, (5.32,5.33) atık ürünlerin sadece açılan AT ve GDM ’lere gönderilmesi kısıtı, (5.34,5.35,5.36,5.37) Açılacak olan AT, GDM ’lerin maksimum ve minimum sayılarını gösteren kısıt, (5.38) tamsayı ve negatif olmama kısıtları.

5.5 Sayısal Örnek

Bu bölümde miktar ve kalite belirsizlikleri altında tersine lojistik ağı için önerilen stokastik modelin daha iyi anlaşılabilmesi için sayısal bir örnek sunulacaktır. Ele

alınan örnekte tersine lojistik ağı beş adet toplama noktası, üç adet ayıklama tesisi ve bir adet geri dönüşüm merkezinden oluşmaktadır. Bununla beraber geri dönüşümden çıkan ürünlerin gönderileceği birer adet hammadde pazarı, rafine tesisi ve bertaraf merkezi bulunmaktadır. Modelde ayıklama tesisi ve geri dönüşüm merkezlerinin açılıp açılmama kararları ile tesisler arasında taşınacak ürün miktarı belirlenmeye çalışılacaktır. Buna göre sayısal örnek için tasarlanan tersine lojistik ağı şekil 5.4’te gösterilmiştir.



Şekil 5.4: Sayısal örnek için tersine lojistik ağı.

Toplama merkezlerinde belediye, üretici firma, son kullanıcı ve dağıtıcı firmalardan toplanan iki farklı atık ürün toplanmaktadır. Bu atıklar lisanslı araçlarla öncelikle ayıklama tesislerine getirilerek burada ön muayene işleminden geçmektedirler. Bunun neticesinde bir kısım ürün geri dönüşüm merkezine bir kısım ürün ise bertaraf merkezine gönderilmektedir. Geri dönüşüm merkezine gelen ürünler ise geri dönüşüm işlemine tabi tutulmaktadır. Bu işlem neticesinde geri dönüşümü gerçekleştirilen ürünler hammadde pazarına gönderilmektedir. Geri dönüşümü yapılamayan tehlikeli madde vb. ise bertaraf merkezlerine taşınmaktadır. Son olarak da firma tarafından geri dönüşüm lisansına sahip olmamak ya da geri dönüşüm için gerekli teknolojiye sahip olmamak vs. nedenlerden dolayı bir kısım ürün ise rafine tesislerine gönderilmektedir. Önerilen model tesisler arasında taşınan ürün miktarlarını, ayıklama ve geri dönüşüm tesisleri için açılıp açılmama kararını toplam ağ maliyetini en küçükleyecek şekilde karar vermeyi amaçlamaktadır.

Aşağıdaki çizelge 5.1 ve çizelge 5.13 arasındaki çizelgelerde sayısal örnekte kullanılan tesis kapasiteleri, tesis açılış maliyetleri, tesisler arası ürün taşıma maliyetleri, ürün işleme, toplama, bertaraf maliyetleri, rafine getirisi, tesisler arası

mesafeler, toplanan atık miktarı ve bir takım oranlar vb. parametre değerleri aktarılmıştır.

Çizelge 5.1: Tesis kapasiteleri.

	Ürün 1	Ürün 2
Ayıklama tesisi 1	1500	1000
Ayıklama tesisi 2	1750	1500
Ayıklama tesisi 3	1000	1000
Geri Dönüşüm Merkezi	3000	2500

Çizelge 5.2: Tesis açılış maliyetleri (TL).

Tesis Açılış Maliyeti	TL
Toplama Noktası 1	1000
Toplama Noktası 2	1500
Toplama Noktası 3	1250
Toplama Noktası 4	750
Toplama Noktası 5	1500
Ayıklama Tesisi 1	50000
Ayıklama Tesisi 2	40000
Ayıklama Tesisi 3	35000
Geri Dönüşüm Merkezi	200000

Çizelge 5.3: Toplama noktasından ayıklama tesisine birim ürün taşıma maliyeti (TL).

	Ayıklama Tesis 1	Ayıklama Tesis 2	Ayıklama Tesis 3
Toplama Noktası 1	0,68	0,38	0,97
Toplama Noktası 2	0,54	1,68	1,36
Toplama Noktası 3	1,36	1,85	1,95
Toplama Noktası 4	0,29	1,13	1,62
Toplama Noktası 5	0,64	1,25	1,60

Çizelge 5.4: Ayıklama tesisinden geri dönüşüm ve bertaraf merkezlerine birim ürün taşıma maliyeti (TL).

	Geri Dönüşüm Merkezi 1	Bertaraf Merkezi
Ayıklama Tesisi 1	1,24	0,43
Ayıklama Tesisi 2	1,54	1,54
Ayıklama Tesisi 3	0,63	1,67

Çizelge 5.5: Geri dönüşüm merkezinden rafine tesisi, hammadde pazarı ve bertaraf merkezine birim ürün taşıma maliyeti (TL).

	Rafine tesisi	Hammadde pazarı	Bertaraf merkezi
Geri dönüşüm merkezi	2000	1,2	1,31

Çizelge 5.6: Tesislerde ürün işleme ve elden çıkarma maliyetleri (TL).

	Ürün 1	Ürün 2
Ayıklama Tesisi 1	10	15
Ayıklama Tesisi 2	10	15
Ayıklama Tesisi 3	10	15
Geri Dönüşüm Merkezi	10	18
Bertaraf Merkezi	100	120

Çizelge 5.7: Atık ürün toplama maliyetleri (TL).

	Ürün 1	Ürün 2
Toplama Noktası 1	100	125
Toplama Noktası 2	100	125
Toplama Noktası 3	100	125
Toplama Noktası 4	100	125
Toplama Noktası 5	100	125

Çizelge 5.8: Rafine tesisinde ürün rafine getirileri (TL).

	Rafine tesisi
p1	5000
p2	4000

Çizelge 5.9: Ürünlerin içindeki malzeme oranları.

	Malzeme 1	Malzeme 2	Malzeme 3
Ürün 1	0,58	0,14	0,28
Ürün 2	0,44	0,19	0,37

Çizelge 5.10: Geri dönüşüm merkezinden hammadde pazarı, bertaraf merkezi ve rafine tesisine giden ürün oranları.

	Ürün 1	Ürün 2
Geri dönüşüm merkezi-Hammadde pazarı	0,98	97
Geri dönüşüm merkezi-Bertaraf	0,15	0,0225
Geri dönüşüm merkezi-Rafine tesisi	0,005	0,0075

Çizelge 5.11: Toplama noktaları ile ayıklama tesisleri arasındaki mesafeler (km).

	Ayıklama Tesisi 1	Ayıklama Tesisi 2	Ayıklama Tesisi 3
Toplama Noktası 1	888	1486	276
Toplama Noktası 2	618	190	247
Toplama Noktası 3	900	1204	462
Toplama Noktası 4	632	1153	676
Toplama Noktası 5	1038	107	399

Çizelge 5.12: Ayıklama tesisleri ile geri dönüşüm ve bertaraf merkezi arasındaki mesafeler (km).

	Geri dönüşüm merkezi	Bertaraf merkezi
Ayıklama Tesisi 1	1261	200
Ayıklama Tesisi 2	1468	875
Ayıklama Tesisi 3	1090	1296

Çizelge 5.13: Geri dönüşüm merkezi ile hammadde pazarı, bertaraf merkezi ve rafine tesisi arasındaki mesafeler (km).

	Rafine tesisi	Hammadde pazarı	Bertaraf merkezi
Geri dönüşüm merkezi	4145	1448	203

Belirsiz parametre olan geri dönen ürün miktarının ortalaması 200 ton ve standart sapması 10 olan normal dağılıma uyduğu varsayılmıştır. Buna göre geri dönen ürün miktarı için bu dağılımdan on senaryo üretilmiştir. Bu senaryoların gerçekleşme olasılıkları eşit olarak varsayılmıştır. Aşağıda çizelge 5.14'te üretilen senaryolar gösterilmektedir.

Çizelge 5.14: Farklı senaryolarda toplanan atık miktarları (Ton).

		s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10
Toplama Noktası 1	Ürün 1	194	209	185	194	212	205	199	196	194	189
	Ürün 2	188	203	202	197	201	197	180	208	203	189
Toplama Noktası 2	Ürün 1	197	192	192	194	193	206	190	208	206	196
	Ürün 2	186	182	199	190	185	206	206	201	201	198
Toplama Noktası 3	Ürün 1	200	219	203	191	202	178	199	206	217	198
	Ürün 2	194	194	191	198	208	187	189	204	194	205
Toplama Noktası 4	Ürün 1	222	201	197	183	197	186	194	190	193	204
	Ürün 2	211	206	204	206	195	204	202	208	183	208
Toplama Noktası 5	Ürün 1	175	201	182	199	197	215	190	193	209	218
	Ürün 2	204	191	210	207	189	197	210	194	209	212

Diğer belirsiz parametre olan geri dönen ürün kalitesi ortalaması 0,80 ve standart sapması 0,025 olan normal dağılıma uyduğu varsayılmıştır. Buna göre geri dönen ürün kalitesi için bu dağılımdan on senaryo üretilmiştir. Bu senaryoların gerçekleşme olasılıkları eşit olarak varsayılmıştır. Çizelge 5.15'te üretilen senaryolar gösterilmektedir.

Çizelge 5.15: Farklı senaryolar için ayıklama tesislerindeki ayıklama oranları.

	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10
Ürün 1	0,846	0,843	0,823	0,825	0,842	0,836	0,811	0,817	0,871	0,832
Ürün 2	0,820	0,769	0,814	0,845	0,899	0,844	0,838	0,851	0,860	0,809

Deterministik modelde toplanan ürün miktarı parametresinin çizelge 5.14 ‘daki on senaryo değerinin ortalaması alınarak aşağıda çizelge 5.16’ da gibi belirlenmiştir.

Çizelge 5.16: Toplama noktalarına gelen atık ürün miktarları (ton).

	Ürün 1	Ürün 2
Toplama Noktası 1	197,7	196,8
Toplama Noktası 2	197,5	195,4
Toplama Noktası 3	201,3	196,4
Toplama Noktası 4	196,6	202,5
Toplama Noktası 5	197,9	202,3

5.5.1 Monolitik SP çözümü

Tersine lojistik ağ tasarımı için geliştirilen deterministik ve monolitik stokastik programlama modelleri için sayısal örnek çözümünden elde edilen optimal değer ve optimal çözümler çizelge 5.17 ve çizelge 5.18’de aktarılmıştır. Amaç var olan ya da potansiyel toplama noktası, ayıklama merkezi geri dönüşüm merkezlerinin açılıp açılmama kararlarının verilmesi, hangi miktarda ürünün toplama noktası, ayıklama merkezi, geri dönüşüm merkezi, bertaraf merkezi, hammadde pazarı ve rafine tesisi arasında taşınması gerektiğinin belirlenmesi ve maliyeti en küçükleyen bir ağ yapısı oluşturmaktır. Bu amaçla literatürde yaygın olarak kullanılan karışık tamsayılı doğrusal programlama (KTDP) kullanılarak GAMS 23.5.1/CPLEX 12.2 optimizasyon programı ile çözülmüştür. Geliştirilen deterministik ve stokastik modellerin Windows 7 Core i7 2.00 GHz 512 MB RAM bilgisayarda çözülmüştür.

Çizelge 5.17’de önerilen deterministik ve monolitik stokastik programlama modellerinin özet değerleri verilmektedir. Buna göre monolitik stokastik programlama modelinin deterministik modele göre daha karmaşık yapıda olduğu görülmektedir. Burada deterministik olarak sunulan sonuçlar, on adet senaryo için ayrı ayrı çözülen deterministik modellerin amaç fonksiyonları ortalamasıdır. Buna beklenen değer problemi de denilmektedir.

Çizelge 5.17: Monolitik SP ve deterministik modelin özeti.

	Deterministik Model (Bekle ve Gör Problemi)	Monolitik SP Modeli
Amaç Fonksiyonu	5.070.820,23 TL	5.150.126,7 TL
Çözüm Süresi	4,9917 sn	5,167 sn
İterasyon Sayısı	9	10
Kısıt Sayısı	82	759
Sürekli Değişken Sayısı	76	584
Kesikli Değişken Sayısı	19	19

Çizelge 5.18’de on adet senaryo için çözülen deterministik model optimal değer ve optimal sonuçları aktarılmıştır.

Çizelge 5.18: Deterministik model (bekle ve gör problemi) sonuçları.

	Maliyet (TL)	Optimal Çözüm		Çözüm Süresi (sn)
		AT	GDM	
Senaryo 1	5.053.238,365	[100]	[1]	5,001
Senaryo 2	5.266.534,352	[110]	[1]	5,029
Senaryo 3	5.274.220,419	[110]	[1]	4,962
Senaryo 4	4.966.451,868	[100]	[1]	4,976
Senaryo 5	4.981.965,780	[100]	[1]	4,937
Senaryo 6	4.998.981,481	[110]	[1]	4,962
Senaryo 7	5.148.312,795	[110]	[1]	4,968
Senaryo 8	5.091.265,959	[110]	[1]	5,164
Senaryo 9	5.015.549,528	[110]	[1]	4,972
Senaryo 10	4.911.681,742	[100]	[1]	4,946
Ortalama Değer	5.070.820,230	[110]	[1]	4,9917

Bir diğer yaklaşımda ise stokastik programlama modelinde belirsiz parametreler olan kalite ve miktar parametreleri için olasılık dağılımları kullanılarak üretilen on adet senaryo değerlerinin ortalaması alınarak deterministik model çözülmüştür. Buna beklenen değer problemi denilmektedir. Bu şekilde çizelge 5.19’da deterministik çözümler olan bekle ve gör problemi ile beklenen değer problemi ve stokastik programlama çözümü için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

Çizelge 5.19: SP ve deterministik model sonuçları.

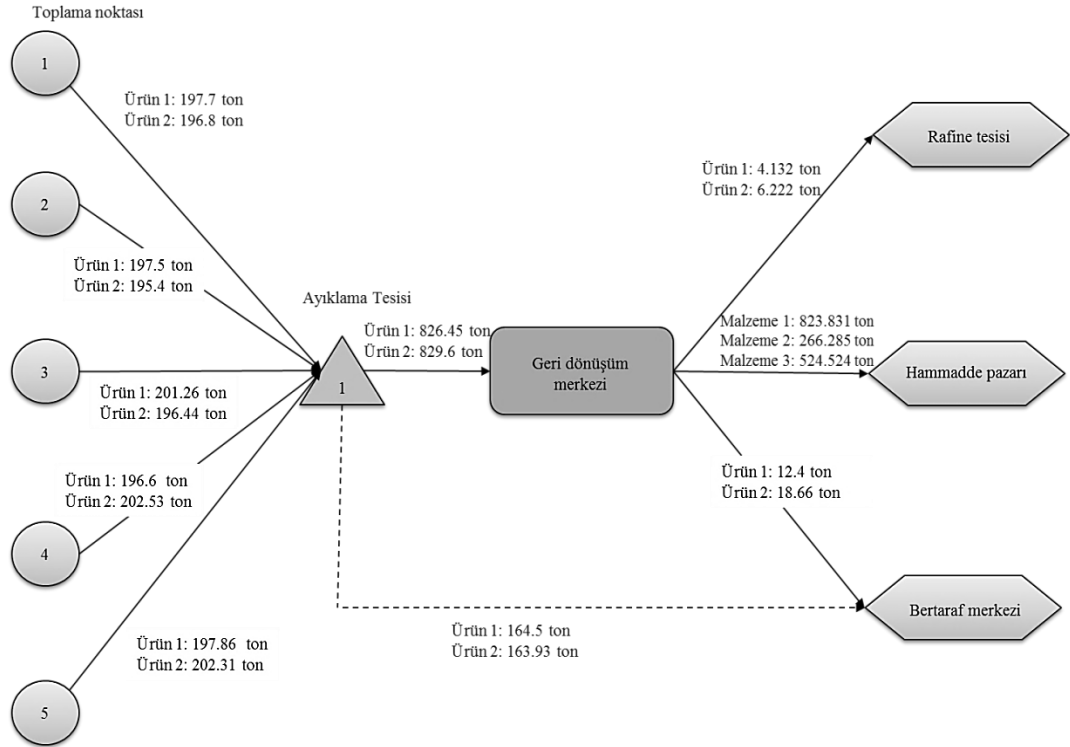
	Maliyet (TL)	Optimal Çözüm		Çözüm süresi (sn)
		Ayıklama tesisi	Geri dönüşüm merkezi	
Deterministik (Bekle ve Gör Problemi)	5.070.820,23	[100]	[1]	4,9917
Deterministik (Beklenen Değer Problemi)	5.090.995,75	[110]	[1]	5,049
Monolitik SP	5.150.126,70	[110]	[1]	5,167

Sonuçlara göre deterministik model (bekle ve gör problemi) 4,9917sn’ de, önerilen stokastik programlama modeli ise 5,167 sn’ de çözüme ulaşmıştır. Ele alınan sayısal örnek küçük bir problem olduğu için çözüm süreleri kısa ve hemen hemen birbirine çok yakındır. Bununla beraber stokastik programlama modeli deterministik modele göre daha karmaşık yapıda olduğundan çözüm süresi daha uzundur. Çizelge 5.19’a göre deterministik modelin optimal amaç fonksiyonu değeri (5.070.820,23 TL)

stokastik modelin amaç fonksiyonu değerinden (5.150.126,7 TL) daha azdır. Çizelge 5.19’da özetlenen sonuçlara göre geliştirilen stokastik programlama modeli deterministik model çözümü ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir sonuçlar vermektedir. Buradan geliştirilen monolitik stokastik modelin belirsizliklerle başa çıkmada ekonomik ve kullanılabilir bir model olduğu ortaya çıkmaktadır.

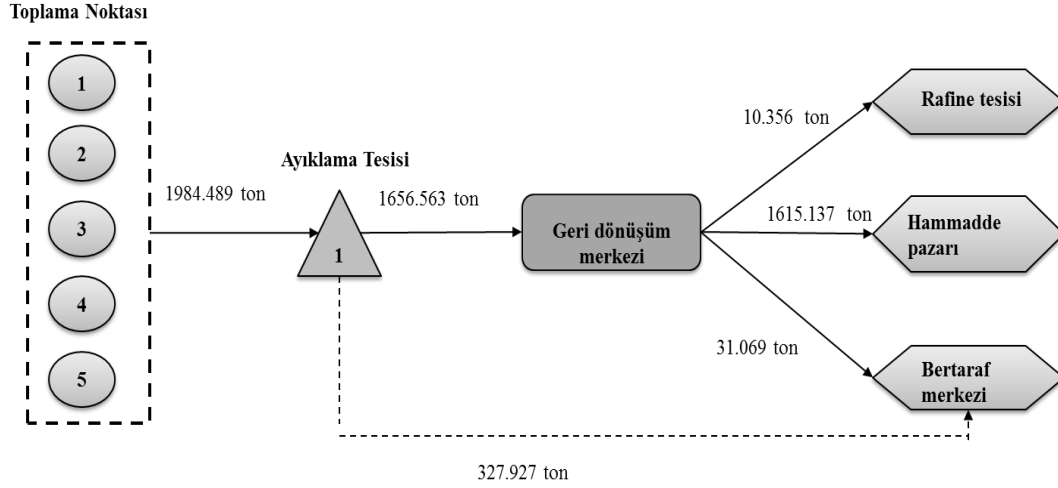
Deterministik model sonuçlarına göre bir numaralı ayıklama tesisinin açılmasına karar verilmiştir. Geri dönüşüm merkezi olarak da bir numaralı tesisinin açılmasına karar verilmiştir. Stokastik model sonuçlarına göre ise bir ve iki numaralı ayıklama tesisleri ile bir numaralı geri dönüşüm merkezinin açılmasına karar vermiştir.

Şekil 5.5’de ise deterministik beklenen değer problemi çözümü sonucunda elde edilen tesisler arası taşınması gereken e-atık miktarları ve atamalar gösterilmektedir.



Şekil 5.5: Deterministik beklenen değer problemi çözümüne göre tesisler arası taşınması gereken ürün miktarları.

Şekil 5.6’de ise stokastik programlama modeli çözümü sonucunda elde edilen tesisler arası taşınması gereken e-atık miktarları ve atamalar gösterilmektedir.



Şekil 5.6: Önerilen stokastik model çözümünden elde edilen ürün atama miktarları.

Önerilen SP modeli ile deterministik model karşılaştırmak için başvurulacak çözüm boşluğu ya da stokastik çözümün göreceli değeri (SÇGD) aşağıdaki formülasyonla hesaplanmıştır (Pishvaei et al. 2010; Nickel et al. 2012; Ishiwata ve diğ., 2012):

$$SÇGD = \frac{|\text{Stokastik Çözüm} - \text{Deterministik Çözüm}|}{\text{Deterministik Çözüm}} \quad (5.39)$$

Buna göre SÇGD değeri %1,56 olarak hesaplanmıştır. Önerilen SP modeli deterministik model (bekle ve gör problemi) çözümünden sadece % 1,56 daha maliyetli bir sonuç vermiştir. Stokastik modelin sonucu beklenen değer problemi ile kıyaslandığında ise SÇGD değeri %1 olarak hesaplanmaktadır. Önerilen SP modeli deterministik model (beklenen değer problemi) çözümünden sadece %1 daha maliyetli bir sonuç vermiştir. Sonuç olarak önerilen modelin belirsizliklerle başa çıkmada kabul edilebilir neticeler verdiği görülmüştür.

5.5.2 SAA çözümü

Çalışmanın bu bölümde sayısal örnek için önerilen stokastik programlama modeli çözümünde Monte Carlo tabanlı SAA metodu kullanılarak elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Bu yöntemde stokastik programlama modeli ile deterministik modelin beklenen değer problemi çözümleri karşılaştırılmaktadır. Beklenen değer problemi olarak bilinen deterministik model belirsiz olan miktar ve kaliteyi ifade eden parametrelerin ortalama değerleri kullanılarak elde edilmektedir. SAA uygulaması için örneklem büyüklüğü için tekrar sayısı 10 olarak seçilmiştir. Sayısal örnekte ele alınan tersine lojistik ağındaki geri dönen miktarı ve kalite parametrelerinin çizelge

5.20’de gösterilen ortalama ve standart sapma değerleri ile normal dağılıma uymakta olduğu varsayılmıştır.

Çizelge 5.20: Belirsiz parametrelerin olasılık dağılım türleri ve özellikleri.

	Dağılım türü	Ortalama	Standart sapma
Miktar	Normal Dağılım	200	10
Kalite	Normal Dağılım	0,85	0,025

Örnek çalışmada stokastik model için en iyi aday seçilmiş ve bu çözümler için istatistiksel değerler hesaplanmıştır. Bu istatistiksel değerler deterministik çözümlerle karşılaştırılmıştır. Örneklem büyüklükleri sırasıyla N= 20, 40 ve 60 olarak belirlenmiştir. N’=1000 için referans örneklem kurulmuştur. Bir başka deyişle, N’= 1000 ile herbir örneklem için üst sınır değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 5.21, çizelge 5.23 ve çizelge 5.25’ de sırasıyla N=20, 40 ve 60 örneklem büyüklükleri için stokastik programlama modelinin birinci aşama sonuçları aktarılmıştır. Çizelge 5.22, çizelge 5.24 ve çizelge 5.26’ de ise sırasıyla N=20, 40 ve 60 örneklem büyüklükleri için ortalama değer problemi ve SAA ile çözülen stokastik programlama çözüm değerler aktarılmıştır. Ayrıca bu örneklemelerin amaç fonksiyonu için maksimum, minimum, ortalama değerleri, üst sınır değeri, optimalite boşluğu ile standart sapma değerleri de verilmiştir.

Çizelge 5.21: N=20 için SP modelinin birinci aşama sonuçları.

Tekrar Sayısı	1. Aşama Çözümler		Amaç Fonksiyonu değeri (TL)
	Ayıklama tesisi (Yj)	Geri dönüşüm tesisi (Zk)	
1	[1 1 0]	[1]	5.123.989,94
2	[1 1 0]	[1]	5.089.660,15
3	[1 1 0]	[1]	5.138.755,53
4	[1 1 0]	[1]	5.128.785,90
5	[1 1 0]	[1]	5.112.332,69
6	[1 1 0]	[1]	5.118.846,06
7	[1 1 0]	[1]	5.148.460,52
8	[1 1 0]	[1]	5.159.492,31
9	[1 1 0]	[1]	5.131.386,59
10	[1 1 0]	[1]	5.125.534,35

Burada SAA çözümünde üst sınır değerini hesaplamak için çizelge 5.21’de gösterilen çözümler içerisinde en küçük amaç fonksiyon değerine sahip olan tekrar N’=1000 senaryo için SAA modeline ilk aşama çözüm değerleri olarak girdiler model çözülmüştür. Buna göre N’ = 1000 senaryo için SP modeli için üst sınır değeri belirlerken ikinci tekrar çözümünün birinci aşama çözüm değerleri olan bir ve iki

numaralı AT ile bir numaralı GDM' nin açılacağı verisi modele girilerek çözüm yapılmıştır. Bu şekilde SP modelinin üst sınır çözümü elde edilmiştir. SAA çözüm aşamaları uygulanarak çizelge 5.22'deki değerler hesaplanmıştır.

Çizelge 5.22: N=20 için SAA sonuçları.

Tekrar	Z^{BDP}	Z^{SAA}
1	4.945.392,62	5.123.989,94
2	4.965.487,31	5.089.660,15
3	5.072.779,95	5.138.755,53
4	5.072.517,14	5.128.785,90
5	4.982.166,61	5.112.332,69
6	4.985.819,87	5.118.846,06
7	5.072.883,16	5.148.460,52
8	5.106.941,65	5.159.492,31
9	4.968.105,77	5.131.386,59
10	4.968.606,44	5.125.534,35
Minimum	4.945.392,62	5.089.660,15
Maksimum	5.106.941,65	5.159.492,31
Ortalama	5.014.070,05	5.127.724,40
Varyans	3,56E+09	3,73E+08
Standart Sapma	59.646,60	19.318,30
Üst sınır	5.075.252	5.136.403,11
Varyans	-	1,07E+07
Standart Sapma	-	3.263,80
Optimal Boşluk	61.181,5326	8.678,70
%Boşluk	1,2055%	0,17%
Optimal Boşluk Varyansı	-	3,84E+08
Optimal Boşluk Standart Sapması	-	19.592,07

N=40 senaryo için elde edilen BDP ve SAA sonuçları çizelge 5.23 ve çizelge 5.24'te görülmektedir.

Çizelge 5.23: N=40 için SP modelinin birinci aşama sonuçları.

Tekrar Sayısı	1. Aşama Çözümler		Amaç Fonksiyonu değeri
	Ayıklama tesisi (yj)	Geri dönüşüm tesisi (zk)	
1	[1 1 0]	[1]	5.104.565,21
2	[1 1 0]	[1]	5.125.744,32
3	[1 1 0]	[1]	5.117.072,41
4	[1 1 0]	[1]	5.122.679,25
5	[1 1 0]	[1]	5.133.286,68
6	[1 1 0]	[1]	5.136.482,92
7	[1 1 0]	[1]	5.113.812,35
8	[1 1 0]	[1]	5.129.738,05
9	[1 1 0]	[1]	5.137.425,84
10	[1 1 0]	[1]	5.132.228,94

SAA çözümünde üst sınır değerini hesaplamak için çizelge 5.23’de gösterilen çözümler içerisinde en küçük amaç fonksiyon değerine sahip olan birinci tekrar için elde edilen çözümün birinci aşama çözüm değerleri $N'=1000$ senaryo için SAA modeline birinci aşama değerleri olarak verilmiştir. Bu şekilde SP modelinin üst sınır çözümü elde edilmiştir. SAA çözüm aşamaları uygulanarak çizelge 5.24’teki değerler hesaplanmıştır.

Çizelge 5.24: N=40 için SAA sonuçları.

Tekrar	Z^{BDP}	Z^{SAA}
1	5.059.269,15	5.104.565,21
2	5.068.507,95	5.125.744,32
3	4.961.192,10	5.117.072,41
4	4.971.651,06	5.122.679,25
5	4.978.392,22	5.133.286,68
6	4.966.204,23	5.136.482,92
7	4.948.110,82	5.113.812,35
8	4.974.303,29	5.129.738,05
9	5.088.572,73	5.137.425,84
10	4.966.561,56	5.132.228,94
Minimum	4.948.110,82	5.104.565,21
Maksimum	5.088.572,73	5.137.425,84
Ortalama	4.998.276,51	5.125.303,60
Varyans	2,71E+09	1,16E+08
Standart Sapma	52.080,3852	10.750,94
Üst sınır	5.072.020	5.131.004,86
Varyans	-	1,02E+07
Standart Sapma	-	3.196,01
Optimal Boşluk	73.743,0627	5.701,26
%Boşluk	1,4539%	0,11%
Optimal Boşluk Varyansı	-	1,26E+08
Optimal Boşluk Standart Sapması	-	11.215,93

N=60 senaryo için elde edilen BDP ve SAA sonuçları çizelge 5.25 ve çizelge 5.26’da çizelgelerde görülmektedir.

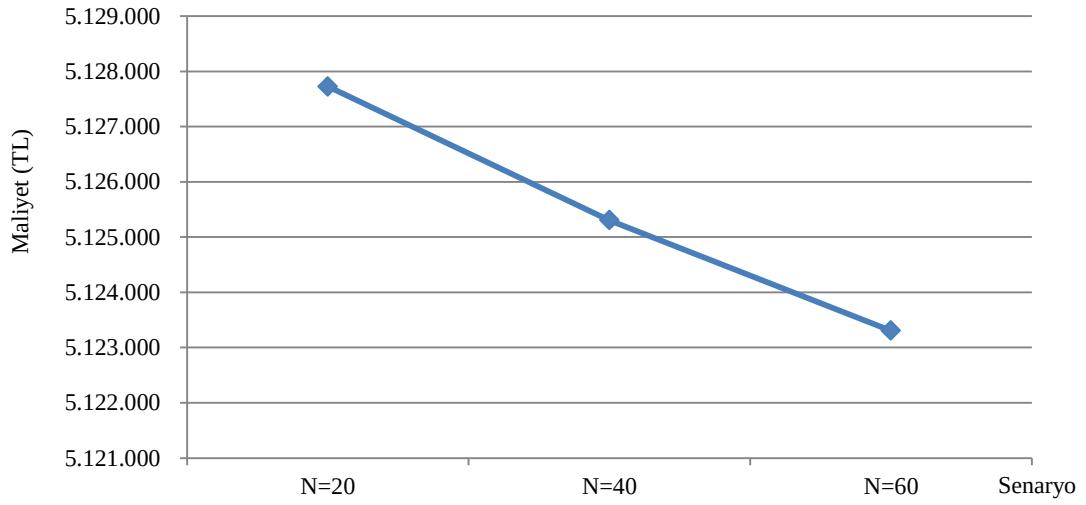
Çizelge 5.25: N=60 için SP modelinin birinci aşama sonuçları.

Tekrar Sayısı	1. Aşama Çözümler		Amaç Fonksiyonu değeri
	Ayıklama tesisi (yj)	Geri dönüşüm tesisi (zk)	
1	[1 1 0]	[1]	5.126.341,66
2	[1 1 0]	[1]	5.127.994,25
3	[1 1 0]	[1]	5.107.379,92
4	[1 1 0]	[1]	5.127.073,22
5	[1 1 0]	[1]	5.109.574,67
6	[1 1 0]	[1]	5.111.145,73
7	[1 1 0]	[1]	5.124.946,36
8	[1 1 0]	[1]	5.126.076,81
9	[1 1 0]	[1]	5.142.960,84
10	[1 1 0]	[1]	5.129.559,02

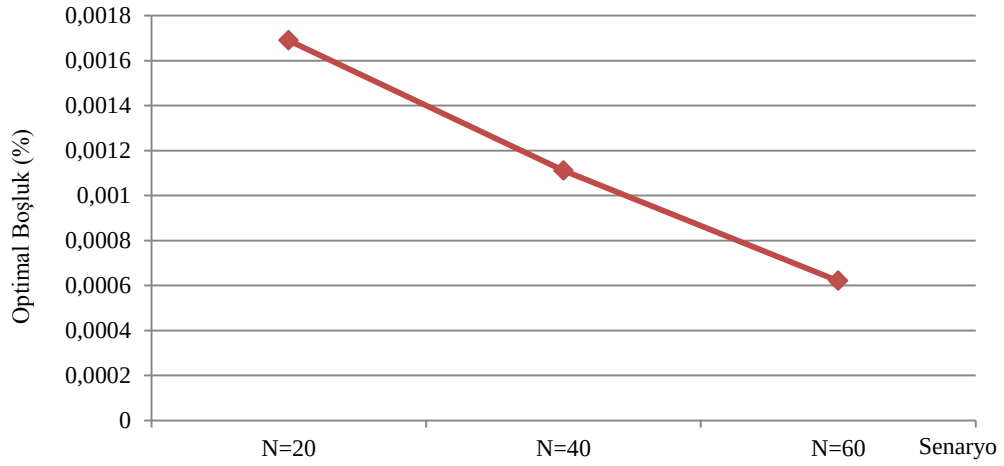
SAA çözümünde üst sınır değerini hesaplamak için çizelge 5.25'te gösterilen çözümler içerisinde en küçük amaç fonksiyon değerine sahip olan üçüncü tekrar için elde edilen çözümün birinci aşama çözüm değerleri N'=1000 senaryo için SAA modeline birinci aşama değerleri olarak verilmiştir. Bu şekilde SP modelinin üst sınır çözümü elde edilmiştir. SAA çözüm aşamaları uygulanarak çizelge 5.26'daki değerler hesaplanmıştır.

Çizelge 5.26: N=60 için SAA sonuçları.

Tekrar	Z ^{BDP}	Z ^{SAA}
1	5.061.614,95	5.126.341,66
2	4.975.985,58	5.127.994,25
3	4.953.805,24	5.107.379,92
4	5.074.747,08	5.127.073,22
5	4.955.611,11	5.109.574,67
6	4.958.256,77	5.111.145,73
7	4.969.786,99	5.124.946,36
8	4.975.318,82	5.126.076,81
9	5.087.319,25	5.142.960,84
10	5.075.093,28	5.129.559,02
Minimum	4.953.805,24	5.107.379,92
Maksimum	5.087.319,25	5.142.960,84
Ortalama	5.008.753,90	5.123.305,25
Varyans	3,31E+09	1,19E+08
Standart Sapma	57.567,7160	10.909,88
Üst sınır	5.067.581	5.126.488
Varyans	-	1,025857E+07
Standart Sapma	-	3.202,90
Optimal Boşluk	58.826,7138	3.183,2088
%Boşluk	1,1608%	0,062%
Optimal Boşluk Varyansı	-	1,29E+08
Optimal Boşluk Standart Sapması	-	11.370,32



Şekil 5.7: Senaryo sayısına göre amaç fonksiyonundaki değişim.



Şekil 5.8: Senaryo sayısına göre optimal boşluk değerindeki değişim.

SAA metodunun yakınsama oranı örneklem büyüklüğüne bağlıdır (Long ve diğ, 2012). Bunun için bu sayısal örnek kapsamında farklı senaryo büyüklükleri için çözümler yapılmıştır. Yukarıdaki çizelgelerde görülebileceği üzere senaryo sayısı arttıkça maliyet düşmekte, üst sınır ve alt sınır arasındaki optimalite boşluğu ve varyans azalmaktadır. Buna göre en iyi çözüm N=60 senaryo büyüklüğü için elde edilmiştir. Aynı şekilde N=60 için en küçük optimalite boşluğu değeri hesaplanmıştır. Küçük optimalite boşluğu çözüm kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir (Long ve diğ, 2012). Buna göre en iyi çözüm N=60 senaryo için elde edilmiştir. Çizelge 5.22, çizelge 5.24 ve çizelge 5.26'daki sonuçlardan en küçük optimalite boşluk % 0,062 ile N=60 senaryo büyüklüğü için elde edilmiştir. Sonuçlara göre uygun ve iyi çözümler elde edebilmek için senaryo sayısının hesaplanan optimalite boşluğu değerinin yeteri kadar küçük olmasını sağlayacak

şekilde artırılması gerektiği görülmektedir. Bu metot kullanılarak elde edilen sonuçlara göre geliştirilen SP' nin belirsizliklerle başa çıkmada kullanılabilir bir model olduğu ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 5.27'de tasarlanan sayısal örnek için monolitik SP çözümü ile SAA yaklaşımının sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre TLAT probleminin çözümü için önerilen monolitik SP modelinin amaç fonksiyon değeri 5.150.126,70 TL 'dir. İlk yaklaşımın aksine çok sayıda senaryo kullanılarak çözülen SAA yaklaşımında ise amaç fonksiyonu 5.123.305,25 TL olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre SAA yaklaşımının belirsizlikler altındaki TLAT probleminin çözümünde daha iyi bir performans gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 5.27: SP modeli çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması.

Model	Amaç Fonksiyonu	Ayıklama Tesisi			Geri Dönüşüm Merkezi
		j1	j2	j3	
Monolitik SP Modeli (10 senaryo)	5.150.126,70	•	•		•
SP modeli için SAA yaklaşımı (60 senaryo)	5.123.305,25	•	•		•
10 senaryo için SP modeli SAA çözümü	5.112.295,19	•	•		•

Bununla beraber SAA yaklaşımının az sayıda senaryo ile çözülen monolitik SP modeline göre çözüm performansını daha açık bir şekilde ortaya koyabilmek SAA yöntemi monolitik yaklaşımdaki senaryo sayısı için çalıştırılmıştır.

Çizelge 5.28: 10 senaryo için SP modeli SAA çözümü.

Tekrar	Maliyet	Optimal Çözüm		Çözüm Süresi (sn)
		AT	GDM	
1	5.108.529,60	[110]	[1]	5,169
2	5.109.290,31	[110]	[1]	5,032
3	5.131.722,58	[110]	[1]	5,207
4	5.135.655,40	[110]	[1]	5,066
5	5.154.781,40	[110]	[1]	5,068
6	5.059.009,45	[110]	[1]	5,044
7	5.096.659,61	[110]	[1]	5,05
8	5.133.950,21	[110]	[1]	5,075
9	5.104.360,45	[110]	[1]	5,031
10	5.088.992,94	[110]	[1]	5,159
Ortalama	5.112.295,19	[110]	[1]	5,0901

Buna göre çizelge 5.27 ve çizelge 5.28’de görüldüğü SAA yaklaşımını on senaryo için çözümü 5.112.295,19 TL olarak hesaplamıştır. Bu değer monolitik SP yaklaşımı çözüm değeri olan 5.150.126,70 TL’den daha düşük bir maliyet değeridir. Sonuç olarak sayısal örnekte geliştirilen TLAT ağı için SAA yaklaşımının daha düşük maliyet vermekle daha iyi bir yöntem olduğu görülmektedir.

5.6 Deneysel Çalışma

Çalışmanın bu bölümünde yukarıdaki sayısal örnek çalışmasındaki veriler kullanılarak önerilen monolitik KTP ve SAA yaklaşımlı SP için farklı problem büyüklükleri ve senaryo sayıları için çözümler yapılmıştır (Bkz Çizelge 5.29 ve Çizelge 5.30).

Çizelge 5.29: Deneysel çalışma problem büyüklükleri.

Problem türü	Toplama merkezi	Ayıklama tesisi	Geri dönüşüm tesisi
10*5*1	10	5	1
20*10*2	20	10	2
30*15*3	30	15	3
40*20*4	40	20	4

Çizelge 5.30: Deneysel çalışma senaryo sayıları.

Senaryo sayısı
5
10
20
50
100
200

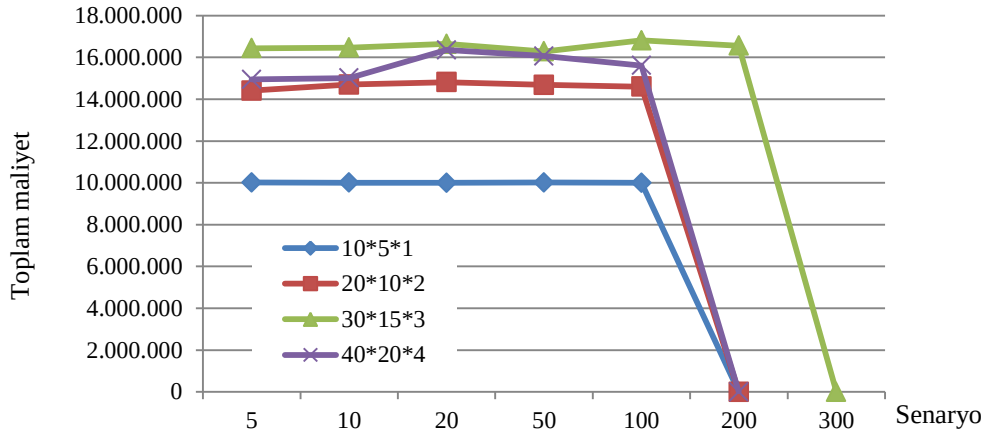
5.6.1 Monolitik SP deneysel çalışması

Çizelge 5.31’de farklı büyüklüklerdeki problem türleri ve farklı senaryo sayıları için önerilen monolitik stokastik programlama modeli optimal değer ve çözümleri ile çözüm süreleri aktarılmıştır.

Çizelge 5.31: Deneysel problem çözümleri.

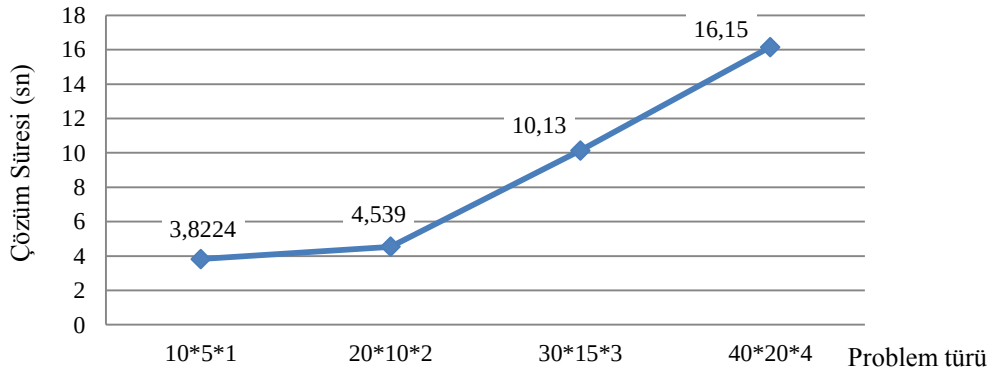
Problem Türü	Senaryo Sayısı	Optimal Çözüm		Amaç Fonksiyonu	Çözüm Süresi
		AT	GDM		
10*5*1	5	[j2,j3,j4,j5]	[k1]	10.013.870	3,656
	10	[j2,j3,j4,j5]	[k1]	10.008.120	4,043
	20	[j2,j3,j4,j5]	[k1]	10.001.430	3,606
	50	[j2,j3,j4,j5]	[k1]	10.016.550	3,921
	100	[j2,j3,j4,j5]	[k1]	10.000.760	3,886
	200	Çözüm yok		-	-
20*10*2	5	[j1,j4,j5,j7,j8]	[k1,k2]	14.407.440	3,591
	10	[j1,j4,j5,j7,j8]	[k1,k2]	14.696.500	3,724
	20	[j1,j4,j5,j7,j8]	[k1,k2]	14.813.300	4,12
	50	[j1,j4,j5,j7,j8]	[k1,k2]	14.681.600	4,761
	100	[j1,j4,j5,j7,j8]	[k1,k2]	14.603.200	6,499
	200	Çözüm yok		-	-
30*15*3	5	[j1,j3,j4,j5,j6,j10]	[k1,k2,k3]	16.438.320	3,905
	10	[j1,j5,j6,j10,j12,j15]	[k1,k2,k3]	16.471.090	4,097
	20	[j1,j4,j5,j6,j10,j15]	[k1,k2,k3]	16.647.700	4,692
	50	[j1,j3,j5,j6,j10,j15]	[k1,k2,k3]	16.286.570	6,992
	100	[j1,j5,j6,j10,j11,j15]	[k1,k2,k3]	16.816.670	11,863
	200	[j1,j3,j5,j6,j10,j15]	[k1,k2,k3]	16.564.240	29,235
40*20*4	300	Çözüm yok		-	-
	5	[j5,j6,j10,j15,j17,j19]	[k2,k3,k4]	14.945.110	4,159
	10	[j1,j5,j6,j10,j15,j19]	[k2,k3,k4]	15.014.520	5,924
	20	[j5,j6,j10,j11,j15,j19]	[k2,k3,k4]	16.356.790	7,88
	50	[j5,j6,j10,j11,j15,j19]	[k2,k3,k4]	16.064.080	28,538
	100	[j5,j6,j10,j13,j15,j19]	[k2,k3,k4]	15.607.630	34,24
	200	Çözüm yok		-	-

Şekil 5.9'a göre ele alınan dört farklı problem türü için farklı senaryolarla yapılan çözümlerde amaç fonksiyon değerinde büyük değişimler görülmemektedir. Bununla beraber belirli bir senaryo sayısından sonra optimal çözüm elde edilememektedir. Buradan önerilen modelin problem büyüklüğünden ziyade senaryo sayısı ile kısıtlandığı ve büyük sayılı senaryolarda monolitik yaklaşımın çözüm vermediği görülmektedir. Burada büyük sayıdaki senaryo ile ele alınan problemlerde örneklem teknikleri kullanılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.9: Senaryo sayısına farklı problem büyüklükleri için amaç fonksiyonu değişimi.

Şekil 5.10 problem büyüklüğü ile beraber problem çözüm süresindeki artışı göstermektedir. Çözüm süresindeki artışın problem büyüklüğü ile beraber doğrusal bir şekilde artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.10: Senaryo sayısına farklı problem büyüklükleri için çözüm süresi değişimi.

5.6.2 SAA yöntemi için deneysel çalışma

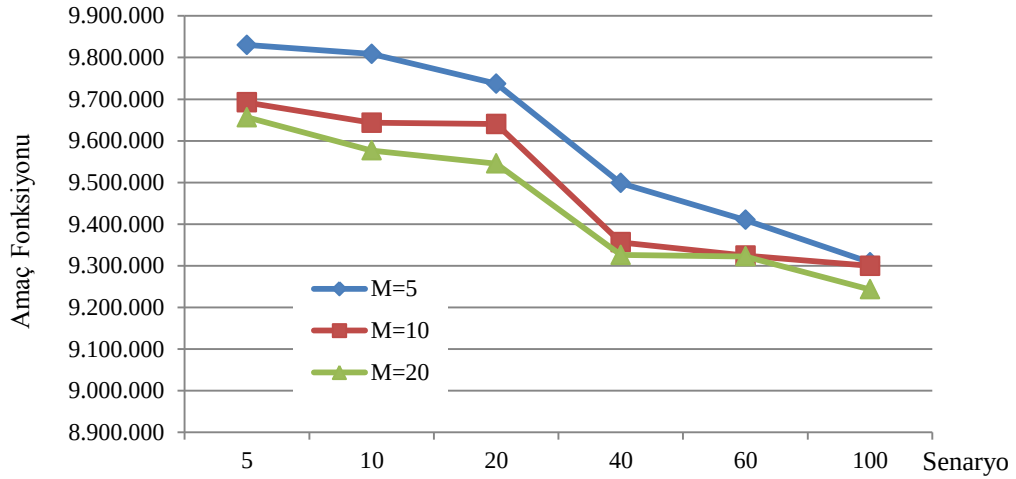
Bu bölümde deneysel çalışma için geliştirilen stokastik programlama modelinin farklı problem büyüklükleri için test işlemi yapılmıştır. Çizelge 5.29 ve çizelge 5.30'daki verilere ek olarak SAA yapısına özel olarak örneklem sayıları 5, 10 ve 20 olarak alınmıştır. Buna göre her bir problem türü için farklı senaryo ve örneklem sayıları olması durumunda toplam 840 problem çözülerek, elde edilen amaç fonksiyon değeri, optimal boşluk ve çözüm süreleri belirlenmiştir.

İlk olarak ele alınan 10*5*1 probleminin optimal değeri ve sonuçları çizelge 5.32'de görülmektedir. Bu sonuçlara göre örneklem sayısı ve senaryo sayısı artış gösterdikçe amaç fonksiyon değerinin ve optimalite boşluğunun düştüğü görülmektedir. Bu çözüm kalitesinin arttığı anlamına gelmektedir.

Çizelge 5.32: Deneysel 10*5*1 problemi için SAA çözümleri.

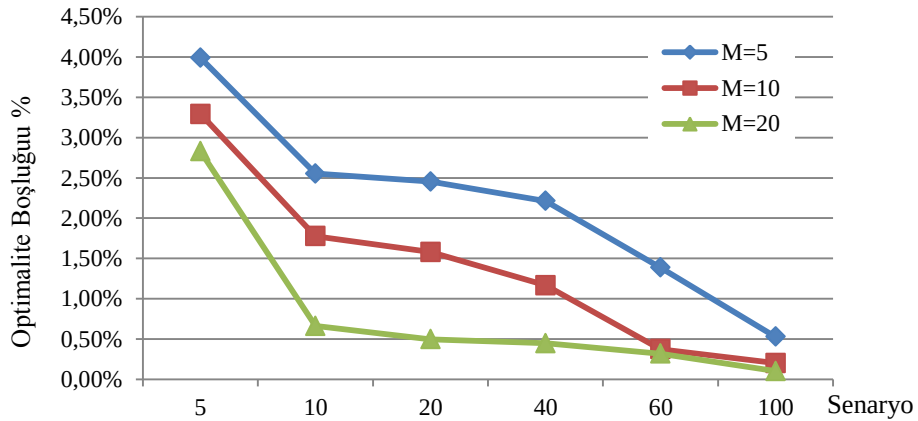
Tekrar sayısı (M)	Senaryo Sayısı	Amaç Fonksiyon Değeri	Çözüm Süresi	Çözümler		Üst sınır N':1000	Optimalite Boşluğu	Optimalite Boşluğu %
				Ayrıtlama Tesisi (Yj)	Geri Dönüşüm Tesisi (Zk)			
5	5	9.830.233,38	5,63	j1,j3,j4,j5	k1	10.222.265,93	392.032,55	3,99%
	10	9.808.434,65	5,97	j2,j4,j5	k1	10.058.893,79	250.459,14	2,55%
	20	9.737.075,60	5,80	j3,j5	k1	9.975.976,62	238.901,01	2,45%
	40	9.498.443,70	5,91	j1,j2,j4,j5	k1	9.708.580,85	210.137,15	2,21%
	60	9.409.910,53	6,09	j3,j4,j5	k1	9.540.423,56	130.513,03	1,39%
	100	9.282.885,41	6,33	j1,j3,j4,j5	k1	9.357.348,86	74.463,45	0,80%
10	5	9.692.169,74	5,65	j1,j2,j3,j5	k1	10.011.083,68	318.913,94	3,29%
	10	9.643.252,05	5,97	j1,j2,j3,j5	k1	9.814.533,43	171.281,39	1,78%
	20	9.640.151,32	6,03	j2,j3,j5	k1	9.792.357,22	152.205,91	1,58%
	40	9.356.163,15	5,93	j1,j2,j4,j5	k1	9.465.243,80	109.080,66	1,17%
	60	9.324.444,02	6,09	j3,j4,j5	k1	9.359.375,82	34.931,80	0,37%
	100	9.299.579,31	6,44	j1,j3,j4,j5	k1	9.318.393,72	18.814,41	0,20%
20	5	9.656.396,30	5,68	j1,j2,j3,j5	k1	9.929.521,92	273.125,62	2,83%
	10	9.576.661,27	5,99	j1,j5	k1	9.640.194,79	63.533,52	0,66%
	20	9.545.429,27	6,11	j1,j2,j5	k1	9.593.002,90	47.573,63	0,50%
	40	9.325.779,01	5,93	j1,j2,j4,j5	k1	9.367.621,95	41.842,94	0,45%
	60	9.322.375,19	6,10	j1,j5	k1	9.352.104,22	29.729,02	0,32%
	100	9.243.417,94	6,39	j1,j2,j4,j5	k1	9.252.840,17	9.422,23	0,10%

Şekil 5.11 'de görüldüğü örneklem sayısı beş ve senaryo sayısı beş iken amaç fonksiyon değeri (toplam maliyet) 10.222.265,93 TL iken aynı senaryo için örneklem sayısı yirmi olduğunda amaç fonksiyon değeri 9.656.396,30 TL'ye düşmektedir. Senaryo sayısı artış gösterdiğinde ise şekilden rahatlıkla görüleceği üzere amaç fonksiyon değeri düşüş göstermektedir. Senaryo sayısı artışına paralel örneklem sayısı artışı amaç fonksiyonundaki düşüşü artırmaktadır. Yine şekil 5.11'e göre örneklem sayısı on ve yirmi için senaryo sayısının kırk ve altmış olması durumunda birbirine çok yakın amaç fonksiyon değerlerine ulaşılmaktadır. Farklı örneklem büyüklükleri için 100 senaryoda elde edilen amaç fonksiyon değerleri birbirine çok yakındır. Buradan çözüm değeri ve kalitesinin belirli bir senaryo sayısında birbirine yakınsadığı ortaya çıkmaktadır.



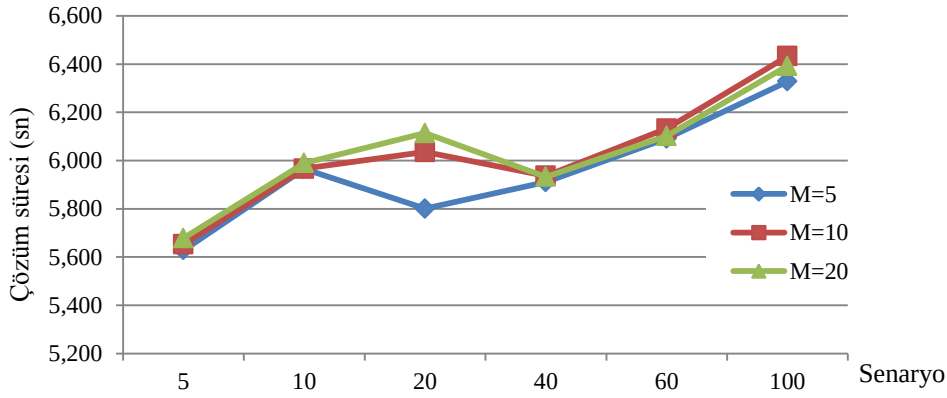
Şekil 5.11: 10*5*1 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için amaç fonksiyon değişimi.

Şekil 5.12'ye göre senaryo sayısı ve örneklem sayısı artışı optimalite boşluğu değerini düşürmektedir. Burada dikkat çeken nokta 60 ve 100 senaryo için örneklem sayısının on ve yirmi olması durumunda optimalite boşluğu değerlerinin hemen hemen aynı olmasıdır. Buradan on örneklem ile dahi atmış ya da yüz senaryo için iyi sonuçlar alınabileceği ortaya çıkmaktadır. Yirmi örneklem ve 100 senaryo için bulunan optimalite boşluğu 0,10% gibi oldukça düşük bir değerdir. Bu ise çözüm kalitesinin çok iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.12: 10*5*1 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için optimalite boşluğu değişimi.

Şekil 5.13'e göre ise örneklem sayısının çözüm süresinde bir etkisi olmadığı görülmektedir. Çünkü her bir tekrar ayrı ayrı yapılmaktadır. Fakat senaryo sayısı artışı ile çözüm süresi üssel bir şekilde artmaktadır.



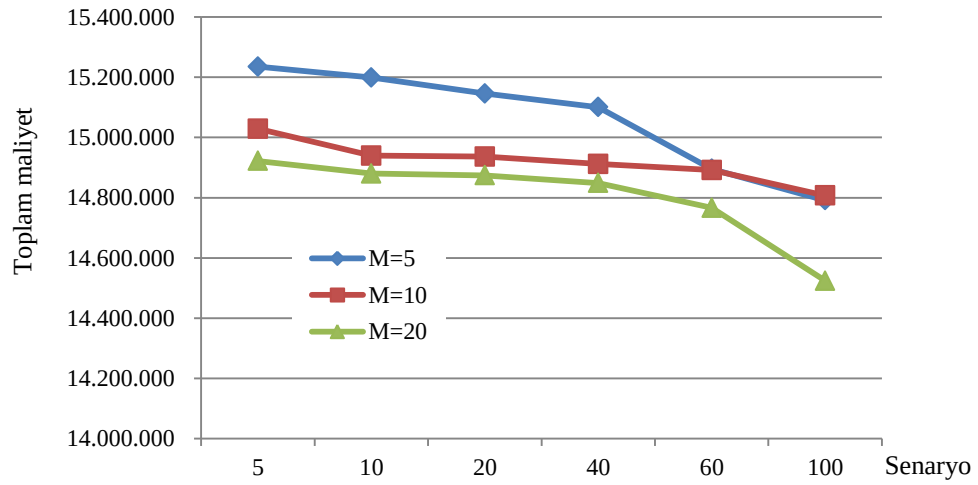
Şekil 5.13: 10*5*1 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için çözüm süresi değişimi.

Çizelge 5.33'te 20*10*2 probleminin optimal değeri ve sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlara göre örneklem sayısı ve senaryo sayısı artış gösterdikçe amaç fonksiyon değerinin ve optimalite boşluğunun düştüğü görülmektedir. 10*5*1 problemi sonuçlarına göre daha yüksek amaç fonksiyon değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 5.33: Deneysel 20*10*2 problemi için SAA çözümleri.

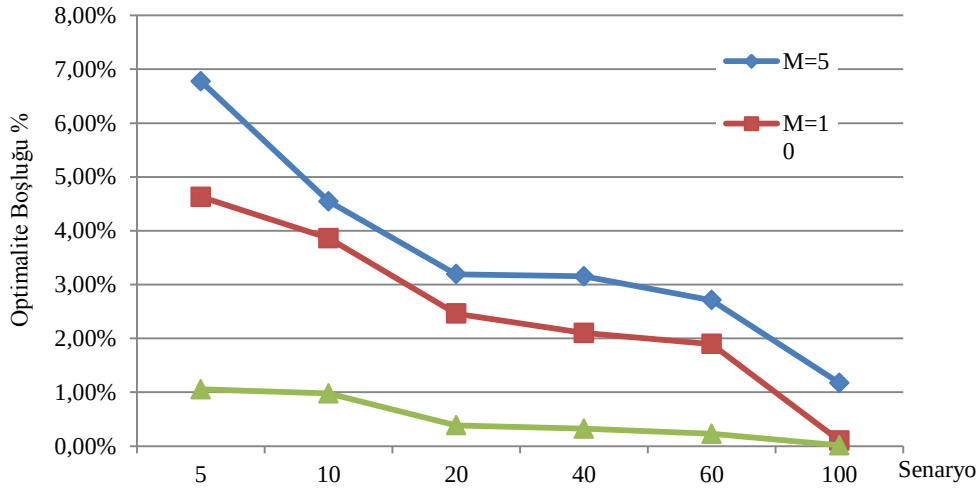
Tekrar sayısı (M)	Senaryo Sayısı	Amaç Fonksiyon Değeri	Çözüm Süresi	Çözümler		Üst sınır N':1000	Optimalite Boşluğu	Optimalite Boşluğu %
				Ayıklama Tesisi (Yj)	Geri Dönüşüm Tesisi (Zk)			
5	5	15.235.139,56	5,90	j1,j4,j5,j7,j8	k1,k2	16.267.201,5	1.032.061,9	6,77%
	10	15.198.666,13	5,79	j1,j4,j5,j7,j8,j10	k1,k2	15.889.301,88	690.635,75	4,54%
	20	15.145.932,43	6,06	j1,j4,j5,j7,j9	k1,k2	15.629.238,17	483.305,75	3,19%
	40	15.100.640,96	6,76	j1,j2,j4,j5,j7,j8	k1,k2	15.576.706,18	476.065,22	3,15%
	60	14.895.713,26	7,17	j1,j4,j5,j7,j8,j10	k1,k2	15.299.346,19	403.632,94	2,71%
	100	14.791.292,76	8,86	j1,j4,j5,j6,j8,j10	k1,k2	14.964.976,40	173.683,64	1,17%
10	5	15.029.060,53	5,77	j1,j4,j5,j8,j10	k1,k2	15.724.666,03	695.605,50	4,628%
	10	14.939.755,58	5,79	j1,j4,j5,j6,j7,j9	k1,k2	15.516.562,24	576.806,65	3,861%
	20	14.936.393,43	6,35	j1,j4,j5,j7,j8	k1,k2	15.303.944,30	367.550,88	2,461%
	40	14.912.085,02	6,91	j1,j2,j4,j5,j7,j10	k1,k2	15.225.238,09	313.153,07	2,100%
	60	14.903.297,60	7,20	j1,j2,j4,j5,j7,j10	k1,k2	15.185.719,31	282.421,71	1,895%
	100	14.807.430,21	9,04	j1,j4,j5,j7,j9,j10	k1,k2	14.822.683,47	15.253,27	0,103%
20	5	14.922.009,24	5,73	j1,j4,j5,j7,j8	k1,k2	15.079.308,80	157.299,56	1,05%
	10	14.880.031,44	6,01	j1,j4,j5,j7,j8,j9	k1,k2	15.025.540,61	145.509,17	0,98%
	20	14.874.143,03	6,06	j4,j5,j7,j8,j10	k1,k2	14.931.502,97	57.359,94	0,39%
	40	14.848.672,61	6,88	j1,j4,j5,j6,j7,j10	k1,k2	14.896.913,24	48.240,63	0,32%
	60	14.766.504,74	7,25	j1,j4,j5,j6,j7,j10	k1,k2	14.800.152,92	33.648,18	0,23%
	100	14.523.953,69	9,22	j1,j4,j5,j7,j8,j9	k1,k2	14.526.220,97	2.267,29	0,02%

Şekil 5.14'te görüldüğü örneklem sayısı ve senaryo sayısı beş iken amaç fonksiyon değeri (toplam maliyet) 15.235.139,56 TL iken aynı senaryo için örneklem sayısı yirmi olduğunda amaç fonksiyon değeri 14.922.009,24 TL'ye düşmektedir. Senaryo sayısı artış gösterdiğinde ise şekilden rahatlıkla görüleceği üzere amaç fonksiyon değeri düşüş göstermektedir. Senaryo sayısı artışına paralel örneklem sayısı artışı amaç fonksiyonundaki düşüşü artırmaktadır. Buna göre 20*10*2 probleminde en küçük amaç fonksiyonu değeri 14.523.953,69 TL olarak yirmi örneklem büyüklüğü ve yüz senaryo için elde edilmiştir.



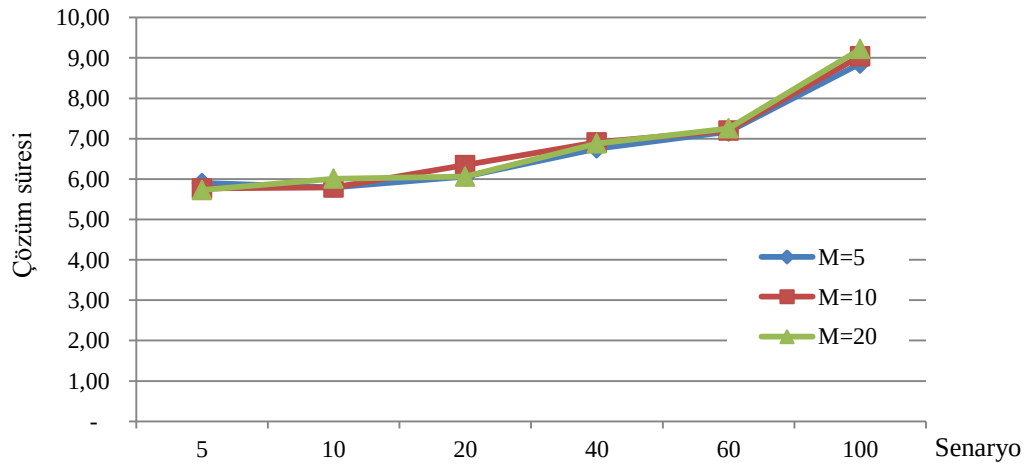
Şekil 5.14: 20*10*2 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için amaç fonksiyon değişimi.

Şekil 5.15'e göre senaryo sayısı ve örneklem sayısı artışı optimalite boşluğu değerini düşürmektedir. Burada dikkat çeken nokta 60 ve 100 senaryo için örneklem sayısının on ve yirmi olması durumunda optimalite boşluğu değerlerinin hemen hemen aynı olmasıdır. Buradan on örneklem ile dahi atmış ya da yüz senaryo için iyi sonuçlar alınabileceği ortaya çıkmaktadır. Yirmi örneklem ve 100 senaryo için bulunan optimalite boşluğu 0,10% gibi oldukça düşük bir değerdir. Bu ise çözüm kalitesinin çok iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.15: 20*10*2 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için optimalite boşluğu değişimi.

Şekil 5.16'ya göre ise örneklem sayısının çözüm süresinde bir etkisi olmadığı görülmektedir. Çünkü her bir tekrar ayrı ayrı yapılmaktadır. Fakat senaryo sayısı artışı ile çözüm süresi üssel bir şekilde artmaktadır.



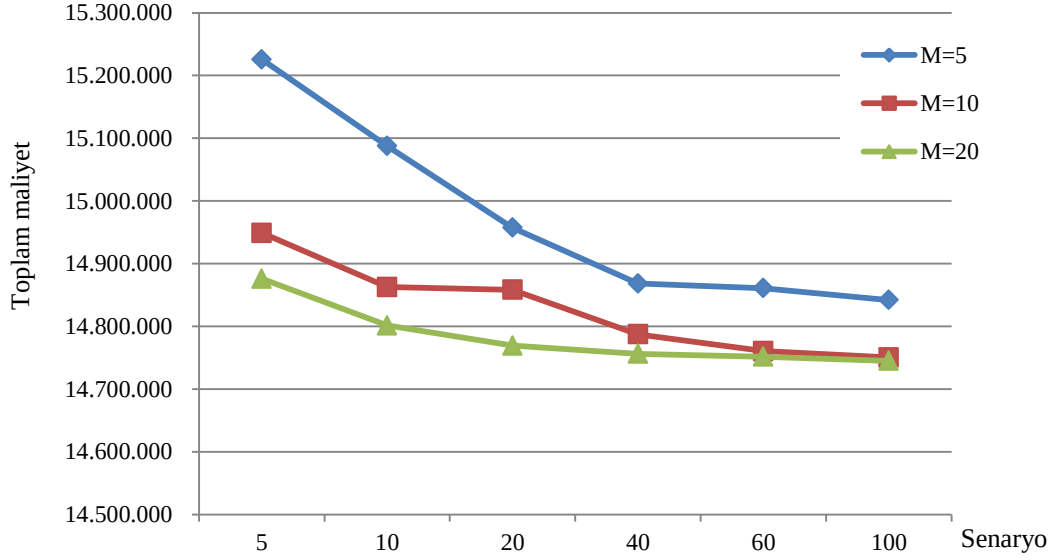
Şekil 5.16: 20*10*2 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için çözüm süresi değişimi.

Çizelge 5.34'te 30*15*3 probleminin optimal değeri ve sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlara göre örneklem sayısı ve senaryo sayısı artış gösterdikçe amaç fonksiyon değerinin ve optimalite boşluğunun düştüğü görülmektedir. 10*5*1 problemi sonuçlarına göre daha yüksek amaç fonksiyon değerleri elde edilmiştir. En düşük amaç fonksiyon değeri 14.755.203 TL ve optimalite boşluğu 0,16% olarak yirmi örneklem ve yüz senaryo için elde edilmiştir.

Çizelge 5.34: Deneysel 30*15*3 problemi için SAA çözümleri.

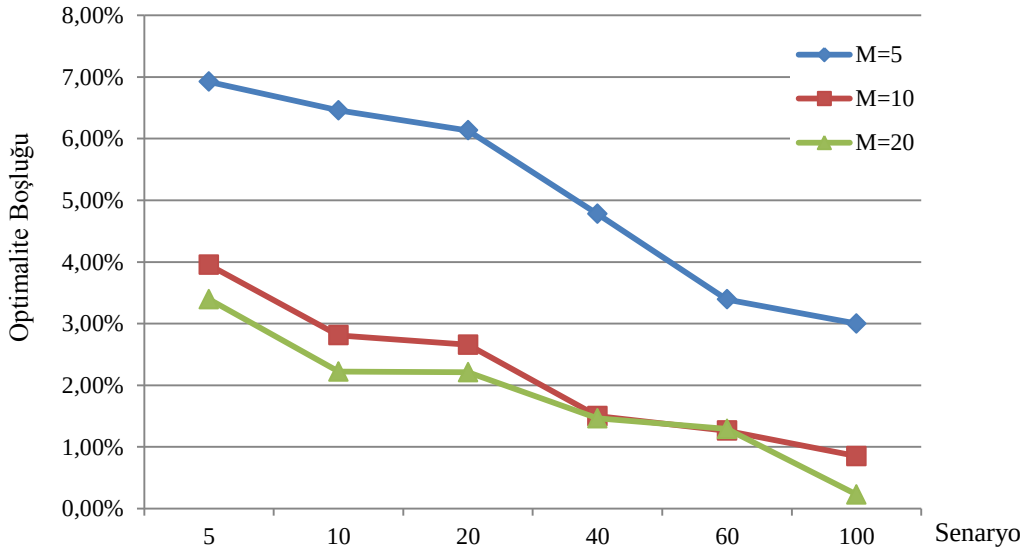
Tekrar sayısı (M)	Senaryo Sayısı	Amaç Fonksiyon Değeri	Çözüm Süresi	Çözümler		Üst sınır N':1000	Optimalite Boşluğu	Optimalite Boşluğu %
				Ayıklama Tesisi (Yj)	Geri Dönüşüm Tesisi (Zk)			
5	5	15.225.702,51	6,43	j1,j3,j4,j5,j6,j10,j14,j15	k1,k2,k3	16.279.733,20	1.054.030,7	6,92%
	10	15.087.578,87	6,48	j1,j2,j4,j5,j6,j10,j11,j14,j15	k1,k2,k3	16.061.895,61	974.316,74	6,46%
	20	14.957.506,69	7,08	j1,j2,j4,j5,j6,j7,j9,j10	k1,k2,k3	15.874.737,33	917.230,65	6,13%
	40	14.868.460,89	8,63	j1,j2,j5,j7,j9,j10,j14,j15	k1,k2,k3	15.579.057,91	710.597,02	4,78%
	60	14.861.012,83	10,39	j1,j2,j4,j5,j6,j10,j14,j15	k1,k2,k3	15.365.013,91	504.001,08	3,39%
	100	14.842.100,68	14,02	j1,j4,j5,j6,j10,j14,j15	k1,k2,k3	15.287.444,20	445.343,53	3,00%
10	5	14.948.974,72	6,49	j1,j4,j5,j6,j9,j10,j14,j15	k1,k2,k3	15.539.821,70	590.846,98	3,95%
	10	14.862.603,66	6,46	j1,j4,j5,j6,j9,j10,j13	k1,k2,k3	15.280.361,08	417.757,42	2,81%
	20	14.858.272,37	7,00	j4,j5,j6,j7,j9,j10,j14,j15	k1,k2,k3	15.253.175,01	394.902,64	2,66%
	40	14.787.482,64	8,65	j1,j4,j5,j7,j9,j10,j15	k1,k2,k3	15.009.315,41	221.832,77	1,50%
	60	14.732.177,23	10,85	j2,j4,j6,j7,j8,j9,j10,j14,j15	k1,k2,k3	14.946.838,64	214.661,41	1,46%
	100	14.763.646,56	14,99	j1,j3,j4,j5,j6,j9,j10	k1,k2,k3	14.875.972,77	112.326,21	0,76%
20	5	14.875.972,64	6,45	j1,j4,j5,j6,j9,j10,j14,j15	k1,k2,k3	15.380.907,78	504.935,14	3,39%
	10	14.801.393,48	6,43	j1,j5,j6,j8,j10,j14,j15	k1,k2,k3	15.129.968,59	328.575,11	2,22%
	20	14.769.311,34	7,02	j4,j5,j6,j7,j9,j10,j14,j15	k1,k2,k3	15.095.798,26	326.486,92	2,21%
	40	14.756.329,89	8,59	j1,j4,j5,j7,j9,j10,j15	k1,k2,k3	14.972.119,18	215.789,29	1,46%
	60	14.751.779,85	10,63	j1,j4,j5,j7,j9,j10,j14,j15	k1,k2,k3	14.942.180,84	190.401,00	1,29%
	100	14.755.203,00	15,06	j1,j3,j4,j5,j6,j9,j10	k1,k2,k3	14.778.302,32	23.099,32	0,16%

Şekil 5.17’de görüldüğü örnekleme sayısı ve senaryo sayısı beş iken amaç fonksiyon değeri (toplam maliyet) 15.225.702,51 TL iken aynı senaryo için örnekleme sayısı yirmi olduğunda amaç fonksiyon değeri 14.875.972,64 TL’ye düşmektedir. Senaryo sayısı artış gösterdiğinde ise şekilden rahatlıkla görüleceği üzere amaç fonksiyon değeri düşüş göstermektedir. Senaryo sayısı artışına paralel örnekleme sayısı artışı amaç fonksiyonundaki düşüşü artırmaktadır. On ve yirmi örnekleme için atmış ve yüz senaryolu çözümlerde amaç fonksiyon değerleri birbirine yakınsamıştır. Dolayısıyla on örnekleme iyi çözüm almak için yeterli gözükmektedir.



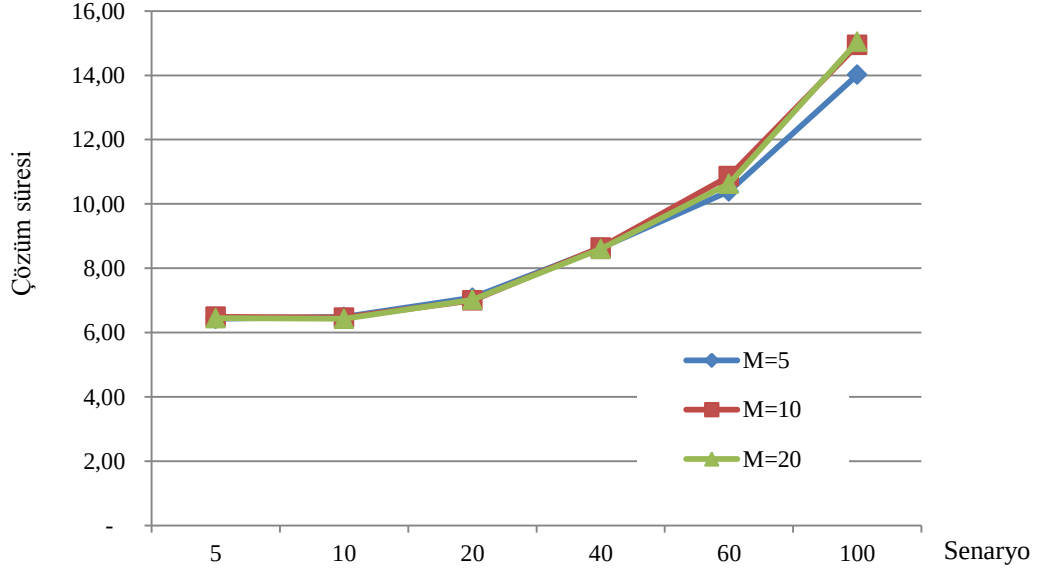
Şekil 5.17: 30*15*3 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için amaç fonksiyon değişimi.

Şekil 5.18'e göre senaryo sayısı ve örneklem sayısı artışı optimalite boşluğu değerini düşürmektedir. 60 ve 100 senaryo için örneklem sayısının on ve yirmi olması durumunda optimalite boşluğu değerleri birbirine çok yakındır. Buradan on örneklem ile dahi atmış ya da yüz senaryo için iyi sonuçlar alınabileceği ortaya çıkmaktadır. Yirmi örneklem ve 100 senaryo için bulunan optimalite boşluğu %0,16'dır. Bu ise çözüm kalitesinin oldukça iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.18: 30*15*3 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için optimalite boşluğu değişimi.

Şekil 5.19'a göre ise örneklem sayısının çözüm süresinde bir etkisi olmadığı görülmektedir. Çünkü her bir tekrar ayrı ayrı yapılmaktadır. Fakat senaryo sayısı artışı ile çözüm süresi üssel bir şekilde artmaktadır.



Şekil 5.19: 30*15*3 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için çözüm süresi değişimi.

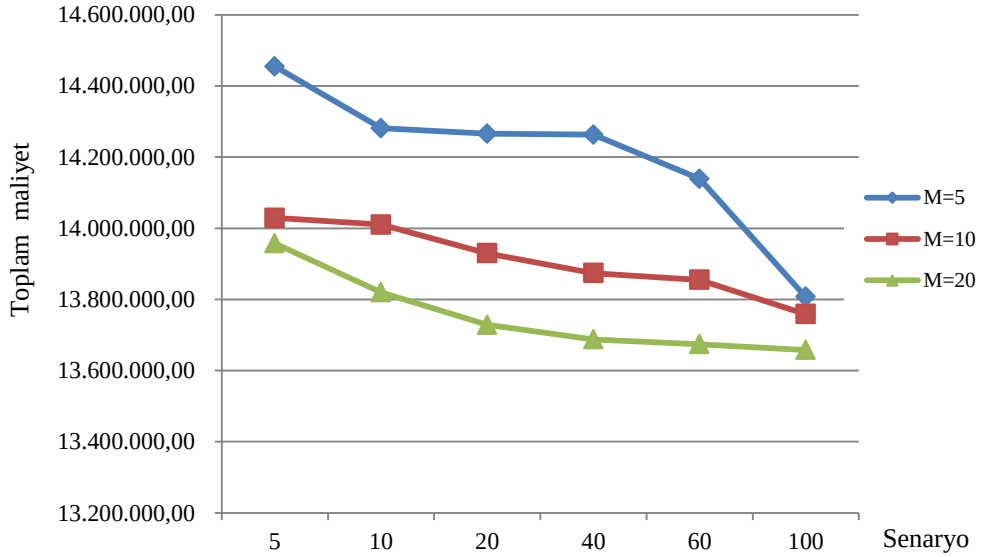
Çizelge 5.35'te 40*20*4 probleminin optimal değeri ve sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlara göre örneklem sayısı ve senaryo sayısı artış gösterdikçe amaç fonksiyon değerinin ve optimalite boşluğunun düştüğü görülmektedir. En küçük amaç fonksiyon değeri olan 13.658.000,74 TL yirmi örneklem ve yüz senaryo ile yapılan çözümde elde edilmiştir.

Çizelge 5.35: Deneysel 40*20*4 problemi için SAA çözümleri.

M	Senaryo Sayısı	Amaç Fonksiyon Değeri	Çözüm Süresi	Çözümler		Üst sınır N°:1000	Optimalite Boşluğu	Optimalite Boşluğu %
				Ayıklama Tesisi (Yj)	Geri Dönüşüm Tesisi (Zk)			
5	5	14.454.758,4	6,92	j1,j4,j6,j7,j8,j10,j13,j15,j16,j17,j18	k2,k3,k4	16.005.518,59	1.550.760,19	10,73%
	10	14.280.981,5	6,94	j1,j5,j6,j8,j9,j10,j12,j15,j16	k2,k3,k4	15.688.069,51	1.407.088,02	9,85%
	20	14.265.478,9	8,83	j1,j6,j7,j9,j10,j13,j15,j16,j20	k2,k3,k4	15.581.066,77	1.315.587,88	9,22%
	40	14.262.819,2	11,14	j1,j4,j5,j6,j10,j14,j15,j16,j20	k2,k3,k4	15.525.641,03	1.262.821,83	8,85%
	60	14.138.914,2	14,96	j1,j5,j9,j10,j14,j15,j16,j17,j20	k2,k3,k4	15.345.511,31	1.206.597,06	8,53%
	100	13.663.936,4	24,43	j1,j5,j6,j8,j9,j10,j14,j15,j16,j18	k2,k3,k4	14.445.198,67	781.262,29	5,72%
10	5	14.029.204,7	6,96	j1,j6,j10,j13,j14,j15,j16,j17,j19,j20	k2,k3,k4	15.106.192,46	1.076.987,70	7,68%
	10	14.010.363,4	7,18	j1,j5,j6,j8,j9,j10,j12,j15,j16	k2,k3,k4	14.942.874,54	932.511,09	6,66%
	20	13.929.772	8,25	j1,j6,j7,j9,j10,j13,j15,j16,j20	k2,k3,k4	14.463.420,64	533.648,62	3,83%
	40	13.874.092	11,46	j1,j4,j5,j6,j10,j14,j15,j16,j20	k2,k3,k4	14.735.996,54	861.904,52	6,21%
	60	13.854.951	16,08	j1,j5,j6,j8,j9,j10,j15,j16,j19	k2,k3,k4	14.610.766,95	755.815,89	5,46%
	100	13.842.842,7	23,84	j1,j4,j6,j8,j9,j10,j15,j16,j18,j19	k2,k3,k4	14.530.574,54	687.731,88	4,97%
20	5	13.957.354,5	6,89	j1,j6,j10,j13,j14,j15,j16,j17,j19,j20	k2,k3,k4	14.754.546,26	797.191,78	5,71%
	10	13.819.893,5	7,12	j1,j5,j6,j8,j9,j10,j12,j15,j16	k2,k3,k4	14.594.935,09	775.041,54	5,61%
	20	13.728.381,8	8,22	j1,j3,j7,j8,j10,j15,j16,j17,j19,j20	k2,k3,k4	14.200.627,22	472.245,45	3,44%
	40	13.687.582,4	11,48	j1,j2,j9,j10,j15,j16,j18,j19,j20	k2,k3,k4	14.366.374,05	678.791,64	4,96%
	60	13.674.097,1	15,64	j4,j5,j6,j10,j15,j16,j18,j19,j20	k2,k3,k4	14.289.455,58	615.358,47	4,50%
	100	13.658.000,7	24,06	j1,j4,j6,j8,j9,j10,j15,j16,j18,j19	k2,k3,k4	14.215.298,34	557.297,60	4,08%

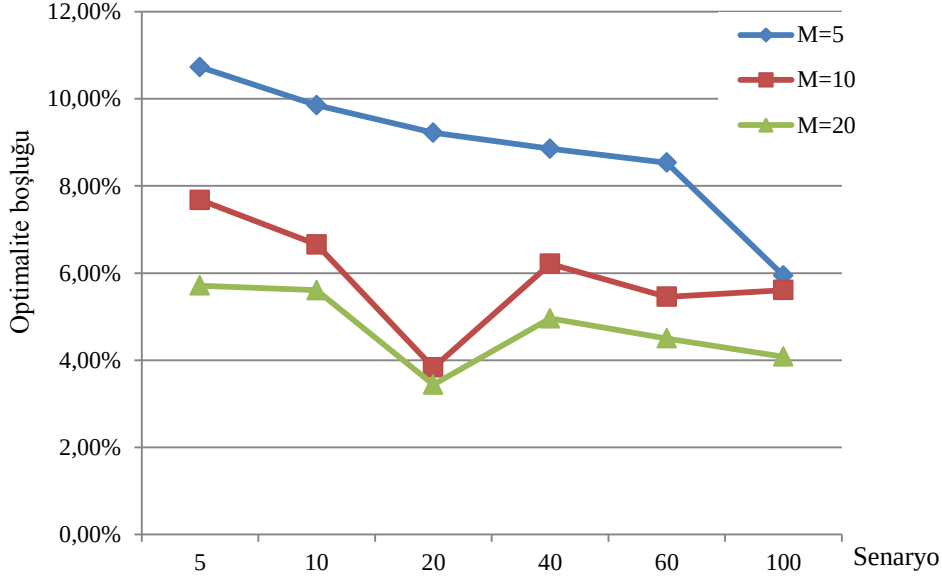
Şekil 5.20 'da görüldüğü örneklem sayısı ve senaryo sayısı beş iken amaç fonksiyon değeri (toplam maliyet) 14.454.758,41 TL iken aynı senaryo için örneklem sayısı yirmi olduğunda amaç fonksiyon değeri 13.957.354,47 TL'ye düşmektedir. Senaryo sayısı artış gösterdiğinde ise şekilden rahatlıkla görüleceği üzere amaç fonksiyon değeri düşüş göstermektedir.

Senaryo sayısı artışına paralel örneklem sayısı artışı amaç fonksiyonundaki düşüşü artırmaktadır. Buna göre 40*20*4 probleminde en küçük amaç fonksiyonu değeri 13.658.000,74 TL olarak yirmi örneklem büyüklüğü ve yüz senaryo için elde edilmiştir.



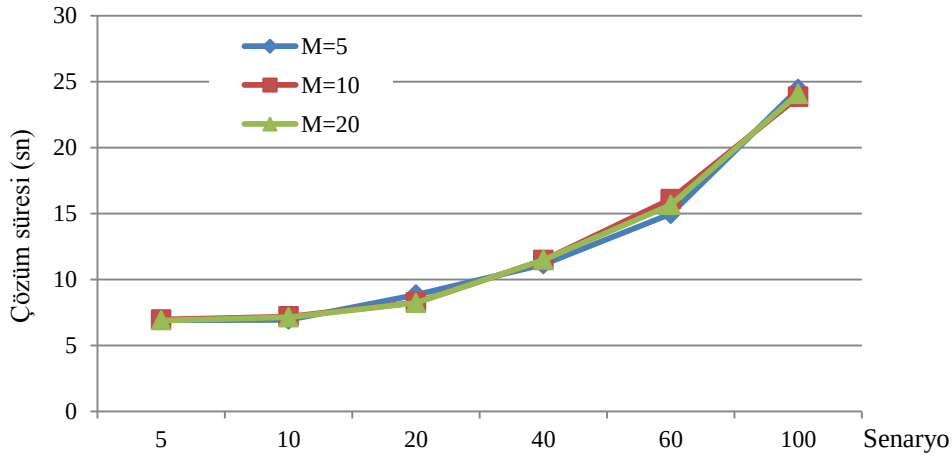
Şekil 5.20: 40*20*4 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için amaç fonksiyon değişimi.

Şekil 5.21'e göre senaryo sayısı ve örneklem sayısı artışı optimalite boşluğu değerini düşürmektedir. Burada dikkat çeken nokta 40 senaryo için örneklem sayısının on ve yirmi olması durumunda optimalite boşluğu değerlerinin hemen hemen aynı olmasıdır. Yirmi örneklem ve 100 senaryo için bulunan optimalite boşluğu 4,08% gibi diğer problem büyüklüklerindeki sonuçlara göre daha düşük kalitede bir çözümdür. Buna göre 4,08% probleminde daha iyi çözüm kalitesi elde edebilmek için senaryo ve örneklem sayısı artırılmalıdır.



Şekil 5.21: 40*20*4 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için optimalite boşluğu değişimi.

Şekil 5.22'e göre ise örneklem sayısının çözüm süresinde bir etkisi olmadığı görülmektedir. Çünkü her bir tekrar ayrı ayrı yapılmaktadır. Fakat senaryo sayısı artışı ile çözüm süresi üssel bir şekilde artmaktadır.



Şekil 5.22: 40*20*4 problemi farklı tekrar sayısı ve senaryo değerleri için çözüm süresi değişimi.

6. UYGULAMA

6.1 AEEE İçin Geliştirilen GDAT Modelinin Yapısı ve Modelde Kullanılacak Veriler

Tez kapsamında bölüm 5’de ayrıntılı olarak açıklanan GDAT modelinin uygulamasının Türkiye’de elektrikli ve elektronik atıkların geri dönüşümü üzerine yapılması kararlaştırılmıştır. Bu bağlamda Türkiye’de AEEE’lerin geri dönüşümünü gerçekleştiren Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından lisansı olan Exitcom Geri Dönüşüm Ltd. adlı firmada geliştirilen modelin uygulaması yapılmıştır. Türkiye’deki AEEE geri dönüşüm süreci ile ilgili ayrıntılı bilgi bölüm 2’de verilmiştir.

Metodoloji kapsamında oluşturulan deterministik ve stokastik programlama modelleri ile GDAT için potansiyel AT ve GDM’lerin açılıp açılmayacağı, hangi TM’lerin hangi AT’ye bağlanacağı, tesisler arası ürün/malzeme taşıma miktarları kararları alınacaktır. Bu kararlar alınırken toplam GDAT maliyetinin minimize edilmesi istenmektedir.

Özellikle çevresel duyarlılığın hızla artmaya başladığı son yıllarda firmaların rekabet avantajı sağlama, sosyal sorumluluk ve devlet tarafından yapılan düzenlemeler etkisi ile tersine lojistik faaliyetlerini bünyelerine katmaları bir zorunluluk haline gelmiştir. Ülkemizde de Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayımlanacak olan AEEE yönetmeliğı ile EEE üretici firmaları sattıkları toplam EEE miktarının belli bir yüzdesini geri toplamak ve geri dönüştürmekle yükümlü tutulacaklardır. Böyle bir durumda ise geri dönüşüm ağlarının kurulum maliyetlerinin yüksek olması firmaları geri dönüşüm işinde uzmanlaşmış üçüncü parti tersine lojistik firmaları ile çalışmaya itmektedir. Çalışmamızda önümüzdeki yıllarda sayılarında artış olacağı beklenen AEEE geri dönüşüm firmaları için tersine lojistik ağ tasarımıında maliyet minimizasyonu sağlayacak oldukça etkin bir ağ tasarım modeli sunulmaktadır.

Exitcom Geri Dönüşüm firması Türkiye’de yakın zamanda önem kazanacak olan bu sahada etkin pozisyon alabilmek için ülkemizin alternatif bölgelerinde ayıklama ve

geri dönüşüm merkezleri kurarak pazarda öncü kuruluş olmak ve rekabet üstünlüğü sağlamak istemektedir.

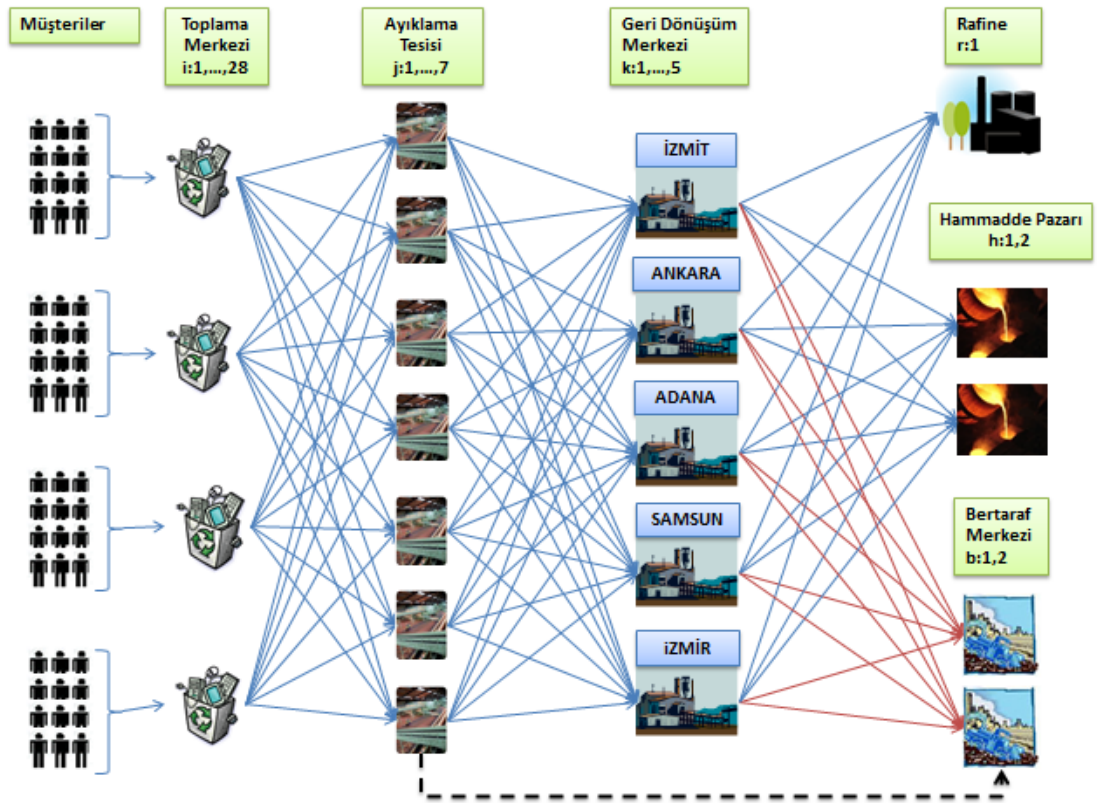
1999 yılında Almanya'nın Hannover şehrinde kurulan Exitcom AEEE geri dönüşümü konusunda hizmet veren bir geri dönüşüm firmasıdır. Exitcom, 2003 yılında ilk e-atık geri kazanım şirketi olarak Türkiye'de faaliyet göstermeye başlamıştır. Almanya/Hannover ve Türkiye/Kocaeli olmak üzere 2 ana noktada hizmetlerini devam ettiren şirket; e-atık, çevre teknolojileri, tersine tedarik zinciri yönetimi konularında bütüncül çözümler ve danışmanlık hizmetleri sunmaktadır. Firma, %92 ila %95 arası geri kazanım oranları ile ortalamanın çok üzerinde geri kazanım oranlarına sahiptir.

Geliştirilen modeldeki elemanlar dağıtıcılar, belediyeler, üreticiler ve son kullanıcılardan oluşan müşteriler, toplama noktaları (TM), ayıklama tesisleri (AT), geri dönüşüm merkezleri (GDM), bertaraf merkezleri (BM), rafineri merkezi (RM) ve hammadde pazarlarından (HP) oluşmaktadır. Toplama noktaları belediye, üretici ve dağıtıcıların belirledikleri yerlerde konuşlandırılan 30 m³, 14 m³ ve 100 kg'lık git terbox denilen farklı ebatlardaki lisanslı konteynerlerden oluşmaktadır.

Exitcom Geri Dönüşüm firmasının, e-atıkları topladığı başlıca birimler aşağıdaki gibidir;

- Belediyeler (Kocaeli'nin tüm ilçeleri, İstanbul – Şişli, Kartal, Ataşehir, Sakarya, Bursa Orhangazi, Tekirdağ ve Edirne illeri vs.)
- Elektrikli ve elektronik ürün dağıtıcıları (Electroworld, Mediamarkt, Teknosa vs.)
- Üreticiler (HP, Vodafone vs.)

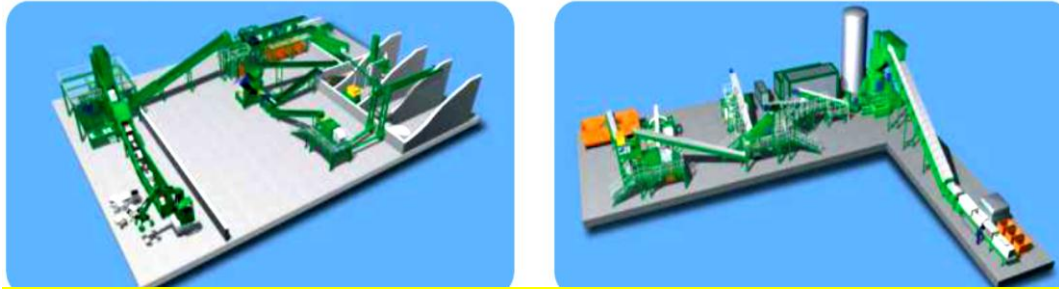
Modelde ayıklama ve geri dönüşüm tesislerinin açılıp kapanma kararları ile ağ bileşenleri arasındaki taşıma miktarları karar değişkenleri olarak alınmıştır. Modelin amacı toplam ağ maliyetinin minimum yapmaktır. Modelin kısıtları tesisler arasında ürün akış kısıtları, kapasite kısıtları, tesis sayısı kısıtları, atama kısıtları ve karar değişkenlerinin tam sayı olma ve negatif olmama kısıtlarıdır. Şekil 6.1'de AEEE geri dönüşüm sürecinde ele alınan uygulamada önerilen tersine lojistik ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 6.1: AEEE geri dönüşüm tersine lojistik ağ yapısı.

AEEE için geliştirilen GDAT' da İstanbul, Balıkesir, Bursa, Edirne, İzmit, Sakarya, Tekirdağ, Yalova, Aydın, Çanakkale, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla, Afyon, Ankara, Eskişehir, Kırıkkale, Konya, Niğde, Adana, Antalya, Mersin, Erzurum, Diyarbakır, Samsun, Trabzon ve Zonguldak'ın içinde bulunduğu yirmi sekiz adet ilde dağıtıcılar, belediyeler, üreticiler ve son kullanıcılar tarafından üretilen e-atıklar, dağıtıcılar, belediyeler, üreticilerin belirlediği yerlerde konumlandırılan konteynerlerde toplanmaktadır. Çalışmada TM'lerde toplanan e-atıkların ilk olarak sevk edildikleri İzmit, Tekirdağ, Erzurum, Antalya, Kayseri, Diyarbakır ve Zonguldak' da potansiyel yerlerinde açılması planlanan yedi adet potansiyel AT bulunmaktadır.

E-atıklar AT'lerden geri dönüşüm işlemi için İzmit, Ankara, İzmir, Adana ve Samsun'daki beş adet potansiyel GDM'ye gönderilmektedir. Firmanın alternatif yerlerde açmayı planladığı GDM' ler yıllık ortalama 10000 - 15000 ton kapasiteli olması ve toplamda elli çalışanlı, saatte altmış buzdolabı, altmış televizyon veya monitör ve beş ton diğer elektronik atık olmak üzere günde çift vardiyada yaklaşık iki yüz ton e-atık işleyebilmektedir. Şekil 6.2'de açılması planlanan geri dönüşüm tesislerindeki teknoloji görülmektedir.



Şekil 6.2: Açılması planlanan kombine geri dönüşüm tesisleri.

Önerilen model çok ürünlüdür. Ürünler AEEE yönetmeliğinde belirtilen esaslara göre ve uygulama yapılanan firmanın lisans durumuna göre çizelge 6.1’de belirtildiği gibi dört kategoride sınıflandırılmıştır.

Çizelge 6.1: Geri dönüştürülen ürün grupları.

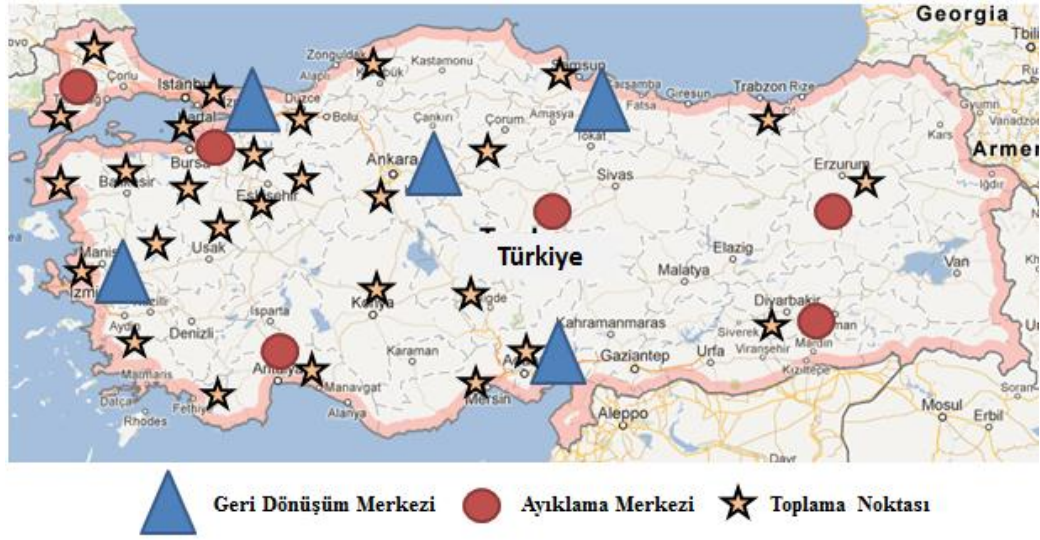
Ürün Grubu	Ürün İçerikleri
Ürün Grubu 1	Büyük ev aletleri, Otomatik dağıtıcılar
Ürün Grubu 2	IT ve telekomünikasyon cihazları tüketici aletleri, Monitör, Televizyon
Ürün Grubu 3	Floresan
Ürün Grubu 4	Küçük ev aletleri, Aydınlatma cihazları, Elektrikli ve elektronik aletler, Oyuncaklar, Spor aletleri, Medikal cihazlar, İzleme ve Kontrol cihazları

Bertaraf tesisi olarak İzmit’te bulunan İzaydaş ile çalışılmaktadır. GDM’lerde lisans probleminden dolayı işlenemeyen değerli malzeme içeren ürünler Belçika’daki RT’ye gönderilmektedir. Çizelge 6.2, bu örnek vakada ele alınan firma için önerilen tersine lojistik ağ yapısını göstermektedir.

Çizelge 6.2: Tersine lojistik ağının yapısı.

Tersine Lojistik Ağının Üyeleri	Sayı
Ürün Sayısı	4
Toplama Noktası	28
Ayıklama Tesisi	7
Geri Dönüşüm Merkezi	5
Bertaraf Merkezi	2
Rafine Tesisi	1
Hammadde Pazarı	2

Şekil 6.3’te açılması planlanan GDM ve AT’lerin potansiyel konumları görülmektedir.



Şekil 6.3: Alternatif TN, GDM ve AT yerleri.

TM'lere ait veriler çizelge 6.3 ve çizelge 6.4' te verilmiştir.

Çizelge 6.3: TM yıllık kurulum maliyetleri.

	Gitterbox (100 kg)	14m3 lük konteyner (1,5 ton)	30 m3 lük konteyner (4 ton)
Yıllık Kurulum Maliyeti (TL)	1200	3500	48000

Çizelge 6.4: TM 'lere ait veriler.

TM Yeri	Gitterbox (100 kg) Adet	14m3 lük konteyner (1,5 ton) Adet	30 m3 lük konteyner (4 ton) Adet	Geri Dönen Ürün Miktarı (Ton)				Toplama MALİYETİ (TL)			
				p1	p2	p3	p4	p1	p2	p3	p4
İstanbul	65	15	6	0,69	40,90	0,17	11,2	130	200	-1000	100
Balıkesir	12	0	0	0,02	0,93	0,00	0,25	130	200	-1000	100
Bursa	7	4	0	0,09	5,17	0,02	1,42	130	200	-1000	100
Edirne	4	0	0	0,01	0,31	0,00	0,08	130	200	-1000	100
İzmit	69	7	2	0,33	19,60	0,08	5,39	130	200	-1000	100
Sakarya	17	1	0	0,04	2,47	0,01	0,68	130	200	-1000	100
Tekirdağ	6	2	0	0,05	2,78	0,01	0,76	130	200	-1000	100
Yalova	2	1	0	0,02	1,31	0,01	0,36	130	200	-1000	100
Aydın	5	1	0	0,03	1,54	0,01	0,42	130	200	-1000	100
Çanakkale	1	0	0	0,00	0,08	0,00	0,02	130	200	-1000	100
İzmir	5	2	2	0,15	8,87	0,04	2,44	130	200	-1000	100
Kütahya	2	0	0	0,00	0,15	0,00	0,04	130	200	-1000	100
Manisa	6	0	0	0,01	0,46	0,00	0,13	130	200	-1000	100
Muğla	0	1	1	0,07	4,24	0,02	1,17	130	200	-1000	100
Afyon	3	0	0	0,00	0,23	0,00	0,06	130	200	-1000	100
Ankara	5	4	0	0,09	5,02	0,02	1,38	130	200	-1000	100
Eskişehir	1	2	0	0,04	2,39	0,01	0,66	130	200	-1000	100

Çizelge 6.4 (devam): TM ‘lere ait veriler.

TM Yeri	Gitterbox (100 kg) Adet	14m3 lük konteyner (1,5 ton) Adet	30 m3 lük konteyner (4 ton) Adet	Geri Dönen Ürün Miktarı (Ton)				Toplama MALİYETİ (TL)			
				p1	p2	p3	p4	p1	p2	p3	p4
Konya	2	2	0	0,04	2,47	0,01	0,68	130	200	-1000	100
Niğde	2	0	0	0,00	0,15	0,00	0,04	130	200	-1000	100
Adana	2	3	0	0,06	3,63	0,02	1,00	130	200	-1000	100
Antalya	1	3	0	0,06	3,55	0,01	0,98	130	200	-1000	100
Mersin	2	2	0	0,04	2,47	0,01	0,68	130	200	-1000	100
Erzurum	0	2	0	0,04	2,31	0,01	0,64	130	200	-1000	100
Diyarbakır	1	2	0	0,04	2,39	0,01	0,66	130	200	-1000	100
Samsun	0	2	0	0,04	2,31	0,01	0,64	130	200	-1000	100
Trabzon	4	0	0	0,01	0,31	0,00	0,08	130	200	-1000	100
Zonguldak	5	0	0	0,01	0,39	0,00	0,11	130	200	-1000	100

AEEE geri dönüşüm ağının bir sonraki adımı olan AT’ler e-atık dönüşlerinin çok olduğu, kişi başına düşen milli gelir düzeyi, gelişmişlik seviyesi vb. etkenler göz önüne alınarak belirlenen alternatif AT yerleri, kapasiteleri, kurulum maliyetleri ve ayıklama maliyetleri çizelge 6.5’te verilmiştir.

Çizelge 6.5: AT’lere ait veriler.

Konum	Kapasite				Yıllık Kurulum Maliyeti	Ayıklama maliyeti			
	p1	p2	p3	p4		p1	p2	p3	p4
İzmit	32000	30000	30000	30000	30000	100	100	100	110
Tekirdağ	35000	30000	30000	30000	15000	100	120	130	120
Erzurum	35000	30000	30000	30000	15000	100	120	120	120
Antalya	30000	30000	30000	30000	29750	100	140	140	140
Kayseri	30000	30000	30000	30000	33750	100	120	120	120
Diyarbakır	30000	30000	30000	30000	25000	100	120	110	130
Zonguldak	30000	30000	30000	30000	15000	100	120	120	120

Alternatif GDM yerleri, kapasiteleri, kurulum maliyetleri ve işleme maliyetleri çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6: GDM' lere ait veriler.

Konum	Kapasite				Yıllık Kurulum Maliyeti	Geri dönüşüm maliyeti			
	p1	p2	p3	p4		p1	p2	p3	p4
İzmit	35000	35000	32000	30000	562500	150	200	120	220
Ankara	40000	35000	32000	35000	503750	150	200	120	220
İzmir	33000	33000	32000	40000	513750	150	200	120	220
Adana	40000	30000	30000	40000	572150	150	200	120	220
Samsun	35000	30000	32000	30000	580750	150	200	120	220

Uygulamada e-atıkların TM, AT, GDM, BM, RM ve HP arasındaki taşıma maliyetleri hesaplanırken firmanın geçmiş sevkiyat verilerinden yararlanılmıştır. Buna göre tesisler arası taşıma maliyetleri aşağıdaki çizelge 6.7 ve çizelge 6.12 arasındaki çizelgelerde özetlenmiştir.

Çizelge 6.7: AT ile GDM arasındaki taşıma maliyetleri.

Konum	İzmit	Ankara	İzmir	Adana	Samsun
İzmit	0,01	0,57	0,41	0,83	1,58
Tekirdağ	1,35	0,97	0,64	1,07	2,19
Erzurum	1,52	1,48	1,35	1,13	1,35
Antalya	1,63	0,89	0,42	0,74	2,41
Kayseri	0,03	0,53	0,76	0,42	1,12
Diyarbakır	1,65	1,65	1,28	0,71	1,96
Zonguldak	1,54	0,45	0,61	1,00	1,36

Çizelge 6.8: AT ile BM arasındaki taşıma maliyetleri.

Konum	Gebze
İzmit	0,27
Tekirdağ	0,44
Erzurum	3,48
Antalya	2,03
Kayseri	2,15
Diyarbakır	4,12
Zonguldak	0,92

Çizelge 6.9: TM ile AT arasındaki taşıma maliyetleri.

Konum	İzmit	Tekirdağ	Erzurum	Antalya	Kayseri	Diyarbakır	Zonguldak
İstanbul	0,27	0,44	3,48	2,03	2,15	4,12	0,92
Balıkesir	0,65	1,32	3,79	1,81	2,27	4,08	1,25
Bursa	0,18	0,49	1,61	0,69	0,91	1,75	0,43
Edirne	0,85	0,23	3,70	2,42	2,53	4,28	1,43
İzmit	0,14	0,01	0,05	0,03	0,03	0,06	0,01
Sakarya	0,11	0,60	2,19	1,17	1,26	2,64	0,37
Tekirdağ	1,35	0,01	1,40	0,88	0,93	1,63	0,49
Yalova	0,18	0,80	3,04	1,57	1,85	3,62	0,75
Aydın	1,00	1,44	2,67	0,63	1,54	2,59	1,40
Çanakkale	0,50	0,80	1,94	1,03	1,24	2,07	0,78
İzmir	0,41	0,64	1,35	0,42	0,76	1,28	0,61
Kütahya	0,63	1,22	2,91	0,90	1,56	2,90	0,97
Manisa	0,37	0,58	1,27	0,38	0,72	1,23	0,56
Muğla	3,38	4,64	7,65	1,64	4,42	7,41	4,34
Afyon	1,85	3,14	6,03	1,52	2,71	5,78	2,64
Ankara	0,57	0,97	1,48	0,89	0,53	1,65	0,45
Eskişehir	1,61	3,34	7,92	3,14	4,00	8,70	2,61
Kırıkkale	0,90	1,26	1,71	1,35	0,52	1,74	0,74
Konya	2,75	3,82	4,05	1,32	1,32	3,80	2,43
Niğde	1,71	2,32	1,88	1,33	0,33	1,77	1,53
Adana	0,83	1,07	1,13	0,74	0,42	0,71	1,00
Antalya	1,63	1,39	3,23	0,01	6,09	10,92	7,90
Mersin	4,10	5,27	6,38	3,29	2,28	4,20	5,25
Erzurum	1,52	1,56	0,01	1,25	0,64	0,32	1,05
Diyarbakır	1,65	1,95	0,40	1,33	0,70	0,00	1,57
Samsun	1,58	2,19	1,35	2,41	1,12	1,96	1,36
Trabzon	3,50	4,39	1,03	4,70	2,33	2,09	3,18
Zonguldak	1,54	3,19	6,96	5,30	3,96	8,58	0,01

Çizelge 6.10: GDM ile BM arasındaki taşıma maliyetleri.

Konum	Gebze
İzmit	0,27
Ankara	0,35
İzmir	0,45
Adana	0,95
Samsun	1,65

Çizelge 6.11: GDM ile HP arasındaki taşıma maliyetleri.

Konum	Bursa
İzmit	0.18
Ankara	0.62
İzmir	0.25
Adana	1
Samsun	1.63

Çizelge 6.12: GDM ile RM arasındaki taşıma maliyetleri.

Konum	Belçika
İzmit	2500
Ankara	2500
İzmir	2500
Adana	2500
Samsun	2500

6.2 Stokastik Programlama Modelindeki Geri Dönen Ürün Miktarı ve Kalite Belirsizliklerinin Giderilmesi

6.2.1 Senaryo üretimi

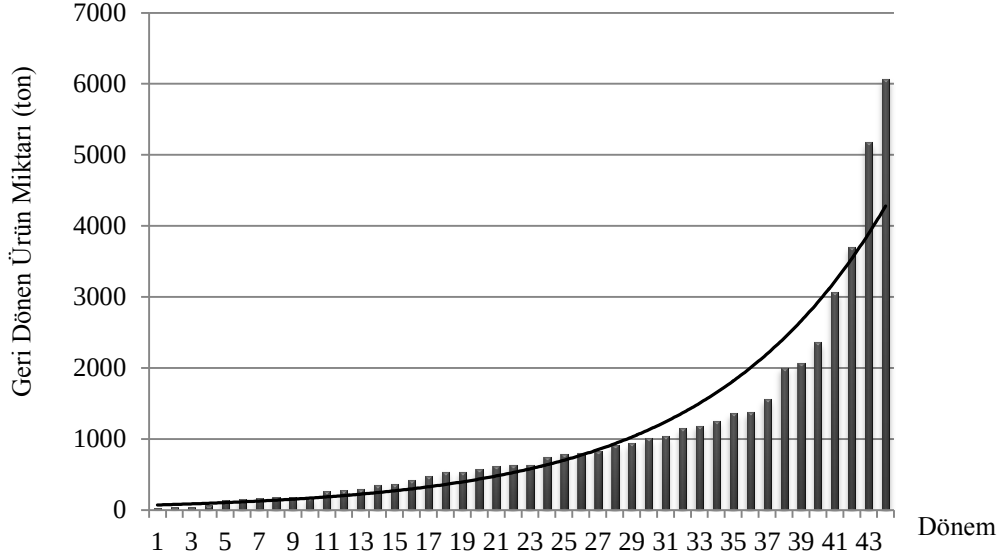
Senaryo planlama, gelecekte meydana gelebilecek mümkün durumların karar vericiler tarafından önceden saptanmasıdır. Amaç, bu mümkün senaryolar altında iyi sonuç veren çözümler elde etmektir. Senaryo analizinde belirsizlik, mümkün tüm senaryoların olasılıklarının varsayılması yoluyla modellenir ve amaç iyi olasılık dağılımına sahip bir çözüm bulmaktır.

a) Geri dönen ürün miktarı (R)

Çalışmanın bu aşamasında R belirsizliğini ortadan kaldırmak için geçmiş verileri dayalı olarak müşterilerden toplanan e-atıkların dağılımına bakılmıştır. Buna göre müşterilerden toplanan ürün miktarı dağılımının ortalaması 1055,2 ve lamda değeri $\lambda = 0,0095$ olan üssel dağılıma uygun olduğu görülmüştür (Bkz Çizelge 6.13). Aşağıda şekil 6.4'te Arena Input Analyzer 13.9 programı kullanılarak elde edilen geri dönen ürün miktarına ait üssel dağılım görülmektedir.

Çizelge 6.13: Geri dönen ürün miktarına ait üssel dağılım özellikleri

Geri dönen ürün miktarı	
Ortalama	1055,2
Lamda	0,0095



Şekil 6.4: Geri dönen ürün miktarı dağılımı.

$$\text{Üssel dağılım denklemi: } (2.2e+003) + \text{Expo } (7.96e+004) \quad (6.1)$$

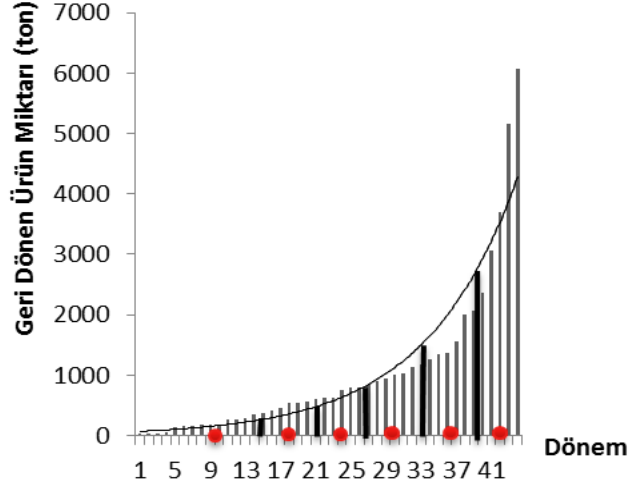
Burada karşımıza iki farklı senaryo üretme metodu çıkmaktadır. Dantzig (1963)'e göre iki aşamalı SP 'de genel yaklaşım belirsiz parametre alanını kesikli hale getirmek ve SP'nin deterministik eş değerini bulmaktır (Karuppiah ve diğ, 2010). Bunun için başvurulacak yaklaşım ise rassal uzayın sınırlı sayıda senaryo ile kesikleştirilmesidir. Bu metot önerilen modelin deterministik eşitlik modeline çevrilip optimizasyon algoritmaları ile çözümüne imkan sağladığı için literatürde son zamanlarda artan bir ilgi görmektedir (Al-Qahtani ve Elkamel, 2010).

Bu açıklamalardan hareketle ilk metotta tarihsel veriler kullanılarak elde edilen sürekli üssel dağılım uygun sayıda aralık sayısına bölünerek herbir aralığın orta nokta değeri alınmıştır.

Buna göre uygun aralık sayısı hesaplamak için literatürde farklı yaklaşımlar vardır. Montgomery'e göre k sınıf sayısını, n ise eldeki veri sayısını göstermek üzere aralık sayısı denklem (6.2)'deki gibi hesaplanmaktadır (Montgomery ve diğ, 2011).

$$k = \sqrt{n} \quad (6.2)$$

Buna göre elimizdeki veri sayısı kırk dört olduğu için denklem (6.2)'ye göre sınıf sayısı 6 olarak belirlenmiştir. Şekil 6.5'te görüldüğü gibi üssel dağılım 6 eşit parçaya bölünerek herbir aralığın orta nokta değeri alınmış ve bu şekilde az sayıda senaryo ile dağılım temsil edilmeye çalışılmıştır.

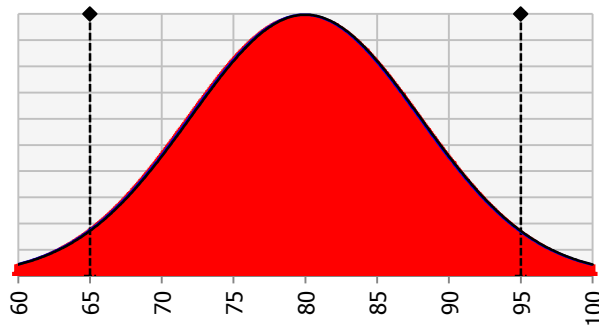


Şekil 6.5: Geri dönen ürün miktarı dağılımı aralığa bölme yaklaşımıyla.

İkinci metotta ise tarihsel veriler kullanılarak elde edilen sürekli üssel dağılımdan SAA metodu uygulamak için yüksek sayıda senaryo oluşturulması söz konusudur.

b) Geri dönen ürün kalitesi (Q)

Önerilen tersine lojistik ağında müşterilerden gelen ürünler toplama noktalarından ayıklama merkezlerine taşınmaktadır. Ayıklama merkezlerinde ürünler ön elemeye tabi tutularak bir kısmı hiçbir işlem görmeden bertaraf merkezine, bir kısmı ise geri dönüşüm ya da diğer tersine lojistik işlemleri için ürün iyileştirme merkezlerine gönderilmektedir. Fakat burada hangi oranda ürünün geri dönüşüme gönderileceği belirsiz bir parametre olarak karşımıza çıkmakta ve bu oran ürünün kalite durumu ile direkt ilişkisi olmaktadır. Dolayısıyla çalışmanın bu aşamasında Q belirsizliğini ortadan kaldırmak müşterilerden gelen e-atık ürünlerin ayıklama tesislerindeki ayıklama oranları için şekil 6.6'da gösterilen normal dağılımından faydalanarak üç senaryo türetilmiştir.



Şekil 6.6: Geri dönen ürün kalitesi dağılımı.

Tarihsel veriler kullanılarak ortalama değeri 0.8, minimum ayıklama oranı 0.65, maksimum ayıklama oranı 0.95 ve standart sapması 0,025 olan geri dönen ürün kalitesine ait normal dağılımdan seçilen üç senaryo çizelge 6.14’te görülmektedir.

Çizelge 6.14: Ürün gruplarının kalite dağılımlarının ortalama ve standart sapma değerleri.

	p1	p2	p3	p4
Ortalama	0.8	0.8	0.8	0.8
Standart Sapma	0,025	0,025	0,025	0,025

6.3 Monolitik SP Modelinin Sonuçları

Üçüncü parti tersine lojistik firmalarının ağ yapısına uygun bir şekilde geliştirilen model için Exitcom firması uygulama alanı olarak seçilmiş ve modelin çözümünde firmaya ait veriler kullanılmıştır. Amaç var olan ya da potansiyel toplama noktası, ayıklama merkezi geri dönüşüm merkezlerinin açma kapama kararlarının verilmesi, hangi miktarda ürünün toplama noktası, ayıklama merkezi, geri dönüşüm merkezi, bertaraf merkezi, hammadde pazarı ve rafine tesisi arasında taşınması gerektiğinin belirlenmesi ve maliyeti en küçükleyen bir ağ yapısı oluşturmaktır. Bu amaçla literatürde yaygın olarak kullanılan karışık tamsayılı doğrusal programlama (KTDP) kullanılarak GAMS 23.5.1/CPLEX 12.2 optimizasyon programı ile çözülmüştür.

Çalışmanın bu kısmında geliştirilen deterministik ve monolitik stokastik programlama modellerin çözümleri aşağıdaki çizelge 6.15 ve çizelge 6.16’ da verilmiştir. Burada deterministik olarak sunulan sonuçlar, on sekiz adet senaryonun için çözülen deterministik modelin amaç fonksiyonu ortalamasıdır. Geliştirilen deterministik ve stokastik modellerin Windows 7 Core i7 2.00 GHz 512 MB RAM bilgisayarda çözülmüştür.

Çizelge 6.15: Senaryo tabanlı SP ve deterministik modellerin özeti.

	Deterministik Model	SP Modeli
Amaç Fonksiyonu	3.065.824,78 TL	3.079.588,666 TL
Çözüm Süresi	0.619sn	1.158 sn
İterasyon Sayısı	86	565
Kısıt Sayısı	1,017	18,661
Sürekli Değişken Sayısı	1,281	20,477
Kesikli Değişken Sayısı	208	208

Çizelge 6.16: SP ve deterministik model sonuçları.

Model	Amaç Fonksiyonu	Ayıklama Merkezi							Geri Dönüşüm Merkezi				
		j1	j2	j3	j4	j5	j6	j7	k1	k2	k3	k4	k5
SP Modeli	3.079.588,6	•	•			•			•				
Deterministik 1	534.567,992	•				•			•				
Deterministik 2	531.905,128	•	•			•			•				
Deterministik 3	494.595,594	•				•			•				
Deterministik 4	1.393.057,476	•				•			•				
Deterministik 5	1.327.128,021	•				•			•				
Deterministik 6	1.277.095,914	•				•			•				
Deterministik 7	2.358.587,575	•	•			•			•				
Deterministik 8	2.245.183,181	•	•			•		•	•				
Deterministik 9	2.153.932,149	•	•			•		•	•				
Deterministik 10	4.042.947,735	•	•		•	•		•	•				
Deterministik 11	3.537.014,935	•	•			•			•				
Deterministik 12	3.528.137,786	•	•		•	•		•	•				
Deterministik 13	5.153.234,907	•	•		•	•		•	•				
Deterministik 14	4.572.975,797	•	•		•	•		•	•				
Deterministik 15	4.345.828,293	•	•		•	•		•	•				
Deterministik 16	6.271.380,692	•	•		•	•		•	•				
Deterministik 17	5.864.574,075	•	•		•	•		•	•				
Deterministik 18	5.552.698,795	•	•		•	•		•	•				
Deterministik Ortalama	3.065.824,780												

Sonuçlara göre deterministik model 0.619 sn' de ve önerilen stokastik model 1.158 sn' de çözüme ulaşmıştır. Stokastik modelin karmaşık yapısının çözüm sürecini uzatmakta olduğu görülmektedir. Çalışmada deterministik model sonucu belirsiz parametreler için oluşturulan senaryoların her biri için deterministik modelin çözülmesi ve elde edilen sonuçların ortalama değerinin alınması neticesinde bulunmuştur. Buna bekle ve gör sonucu denilmektedir. Çizelge 6.15'e göre deterministik modelin optimal amaç fonksiyonu değeri (3.065.824,78 TL) stokastik modelin amaç fonksiyonu değerinden (3.079.588,666 TL) daha azdır. Çizelge 6.15 ve Çizelge 6.16'da özetlenen sonuçlara göre geliştirilen stokastik model deterministik model çözümü ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir sonuçlar vermektedir. Buradan geliştirilen senaryo tabanlı stokastik modelin belirsizliklerle başa çıkmada ekonomik ve kullanılabilir bir model olduğu ortaya çıkmaktadır. Şekil 6.7 ve şekil 6.8'de en uygun sonuçlar görülmektedir.

Deterministik model sonuçlarına göre İzmit, Tekirdağ ve Kayseri ayıklama merkezlerinin açılmasına karar verilmiştir. Geri dönüşüm merkezi olarak da İzmit

tesisinin açılmasına karar verilmiştir. Stokastik model sonuçlarına göre de İzmit, Tekirdağ ve Kayseri ayıklama merkezleri ile İzmit geri dönüşüm merkezinin açılmasına karar vermiştir. Eldeki mevcut veriler de sonuçlarının doğruluğunu destekler mahiyettedir.

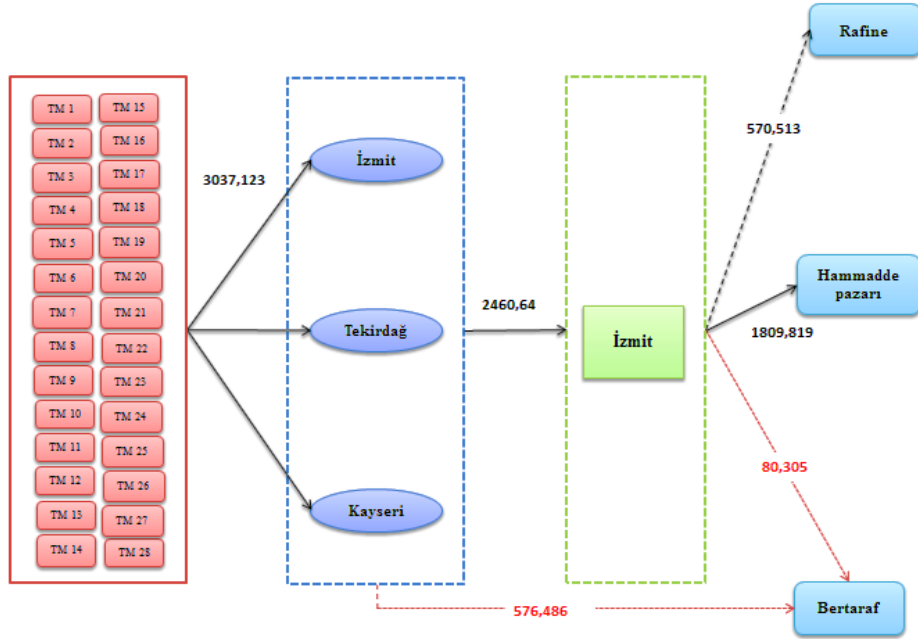


Şekil 6.7: Deterministik model sonuçları.



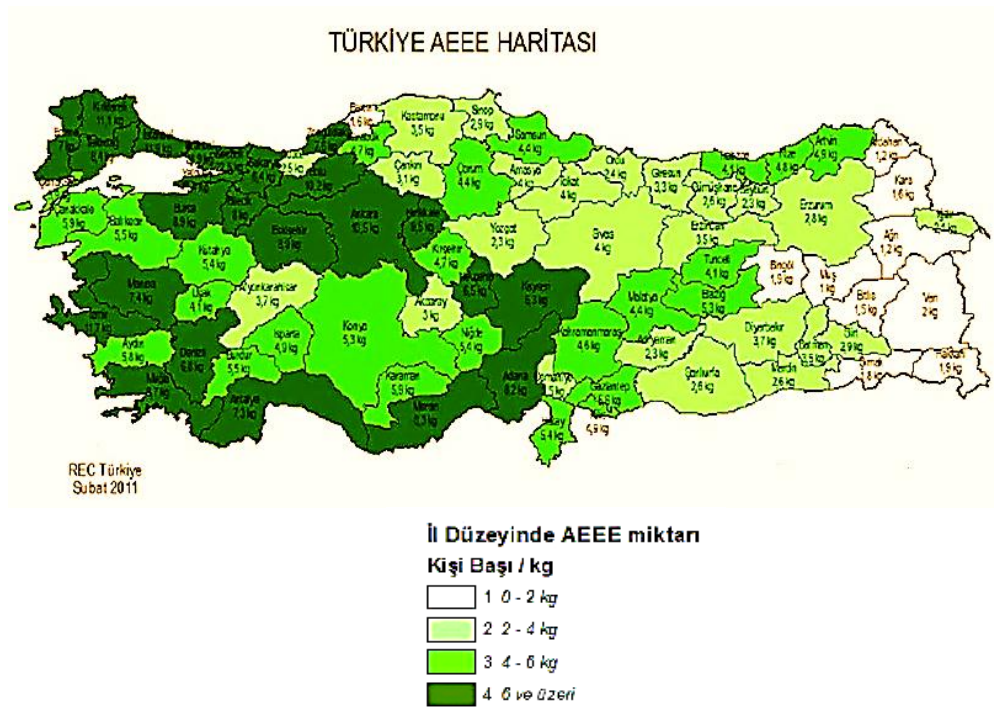
Şekil 6.8: Stokastik programlama modeli sonuçları.

Ek C’de her bir senaryo için deterministik modellerin çözümünden elde edilen ürün atama miktarları görülmektedir. Şekil 6.9’da ise stokastik programlama modeli çözümü sonucunda elde edilen tesisler arası taşınması gereken e-atık miktarları ve atamalar gösterilmektedir.



Şekil 6.9: Önerilen stokastik model çözümünden elde edilen ürün atama miktarları.

Genel olarak seçimler hem taşıma maliyetlerinin minimize edilmesi hem de müşterilere daha çabuk ulaşılmasını sağlayacak şekilde uygun bulunmuştur. Şekil 6.10 'da gösterilen REC firması verileri ile T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı verilerine göre e-atık üretiminin en fazla olduğu yerlerde tesislerin açılması sonuçların uygunluğunu desteklemektedir.



Şekil 6.10: REC tarafından hazırlanan Türkiye AEEE haritası.

SP modeli optimal değere yakın ve daha iyi bir sonuç vermiştir. SP modeli ile deterministik model karşılaştırmak için başvurulacak çözüm boşluğu ya da stokastik çözümün göreceli değeri (SÇGD) denklem 5.1 yardımıyla hesaplanmıştır (Pishvae ve diğ., 2010; Nickel ve diğ., 2012; Ishiwata ve diğ., 2012). Buna göre SÇGD değeri %0.45 olarak hesaplanmıştır. Önerilen SP modeli deterministik model çözümünden sadece % 0.45 daha maliyetli bir sonuç vermiştir. Sonuç olarak önerilen modelin belirsizliklerle başa çıkmada kabul edilebilir neticeler verdiği görülmüştür. Stokastik modelin performansını ölçmek için başvurulacak ikinci yöntem ise deterministik çözüm sonucunda elde edilen tesislerin açılıp kapanma kararlarını stokastik programa girdi olarak verip, aynı sonuçlar için elde edilen amaç fonksiyonu değerini hesaplamaktır. Bu şekilde elde edilen SP çözümü 3.079.588,642 TL olarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşım için SÇGD 0,4489 % olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak önerilen modelin belirsizliklerle başa çıkmada kabul edilebilir neticeler verdiği görülmüştür.

6.3.1 Modelin geçerliliği

Bu bölümde deterministik model ile geliştirilen stokastik GDAT modelinin karşılaştırılması için mükemmel bilginin beklenen değeri (MBBD) ve stokastik çözümün değeri (SÇD) hesaplanacaktır (Domenica vd. 2007). Şekil 6.11’de bu bölümde gerçekleştirilecek olan geçerlilik analizinin akış şeması gösterilmektedir. Bunun için ilk olarak bekle ve gör (BG) olarak adlandırılan değer hesaplanması gerekmektedir.

Bunun için on sekiz adet senaryonun verileri kullanılmış ve her bir senaryonun verilerini deterministik modele ayrı ayrı dâhil ederek deterministik model on sekiz kez çözülmüş ve bu modellerden elde edilen amaç fonksiyonları bir önceki bölümde önerilen stokastik modelde elde edilen amaç fonksiyonu ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.11: Monolitik SP modelinin geçerliliği.

Çizelge 6.17 hesaplanan amaç fonksiyonlarını göstermektedir.

Çizelge 6.17: Herbir senaryo için deterministik model amaç fonksiyon değerleri.

Senaryo	Amaç Fonksiyonu (TL)	Senaryo	Amaç Fonksiyonu (TL)
s1	534.568	s10	4.042.948
s2	531.905	s11	3.537.015
s3	494.596	s12	3.528.138
s4	1.393.057	s13	5.153.235
s5	1.327.128	s14	4.572.976
s6	1.277.096	s15	4.345.828
s7	2.358.588	s16	6.271.381
s8	2.245.183	s17	5.864.574
s9	2.153.932	s18	5.552.699

Senaryoların eşit olasılıklara sahip olmasından dolayı tüm senaryoların en az bir kere gerçekleştiği varsayılırsa, burada BG on sekiz adet deterministik değerlerin ortalama değeridir. Buna göre $BG = 3.065.824,780$ TL olarak hesaplanmıştır. MBBD ise bulunan stokastik modelleme çözüm değerinin BG değerinden çıkartılması ile elde edilir. Ele alınan problem için stokastik sonuç 3.079.588,6 TL idi. Burada ve şimdi (BŞ) çözümü ise geleceğin bilinmeden çözümün yapıldığı yani stokastik programlama çözümüdür. Buna göre $MBBD = BŞ - BG = 13.763,886$ TL olarak hesaplanmış olur.

Hesaplanması gereken ikinci değer olan stokastik çözümün değeri (SÇD) için ilk olarak on sekiz senaryo değerlerinin ortalamasının alınıp bu verileri deterministik modele dâhil ederek, elde edilen beklenen değer (BD) bulunmalı ve o modelin sonucunda elde edilen birinci aşama değişkenlerinin stokastik modele dâhil edilmesiyle BDÇBD hesaplanmalıdır. Yapılan hesaplamalarda BD modelinin sonucunda AT için j1, j2 ve j5 ve GDM için k1 alternatifleri seçilmiştir. Amaç fonksiyonu ise 2.886.286,013 TL olarak hesaplanmıştır.

Bu birinci aşama değişkenleri stokastik modele dâhil edilip model tekrar çözdürüldüğünde BDÇBD modelinin değeri 3.079.588,6 TL olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple $SÇD = BDÇBD - BŞ$ denkleminde ifade edilen stokastik çözümün değeri (SÇD) 0 TL olarak bulunmuştur.

Son olarak aşağıda açıklanan kurallara uygunluk araştırılmıştır. Aşağıdaki temel eşitsizlikler Madansky (1960)'nin çalışmasından alınmaktadır:

$$BG \leq B\hat{S} \leq BD\hat{C}BD \text{ ve}$$

$$0 \leq MBBD, 0 \leq S\hat{C}D, S\hat{C}D \leq BD\hat{C}BD - BD, MBBD \leq BD\hat{C}BD - BD$$

İncelenen durumlarda sonuçların bu eşitsizliklere uyup uymadığı kontrol edilmelidir (Birge ve Louveaux, 1997)

$$1) BG \leq B\hat{S} \leq BD\hat{C}BD$$

$$2.886.286,013 \leq 3.079.588,6 \leq 3.079.588,6$$

$$2) 0 \leq MBBD$$

$$0 \leq 13.763,8 \text{ TL}$$

$$0 \leq S\hat{C}D$$

$$0 \leq 0$$

$$3) S\hat{C}D \leq BD\hat{C}BD - BD$$

$$0 \leq 3.079.588,6 - 3.065.824,8$$

$$0 \leq 13.763,8$$

$$4) MBBD \leq BD\hat{C}BD - BD$$

$$13.763,8 \leq 13.763,8$$

Son olarak yukarıda bahsedilen eşitsizliklerin sağlanıp sağlanmadığına bakılmış ve deterministik modeller ile önerilen stokastik modelinin karşılaştırılması için hesaplanmış olan bu iki değer tüm eşitsizlikleri sağladığı görülmüştür.

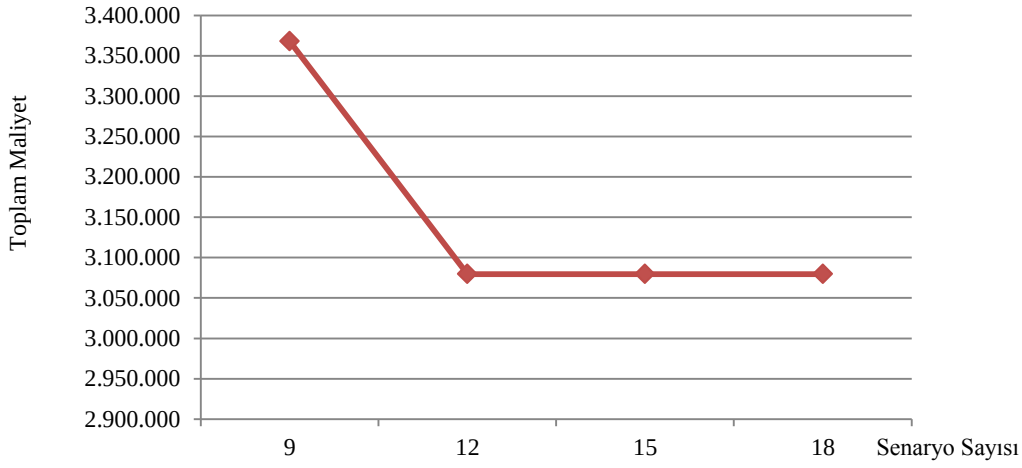
İlk analizde, on sekiz senaryolu stokastik model ile her senaryonun verilerinin deterministik olarak varsayıp modele dâhil edildiği durumlar karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür. Diğer bir geçerlilik analizinde ise farklı senaryo sayıları için geliştirilen SP modelinin sunduğu sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.18’de farklı senaryo sayıları için amaç fonksiyonlarını ve seçilen alternatifleri gösterilmektedir. Çizelgede ilk sütundaki örnek problem 4 bir önceki bölümde önerilen SP modelinin çözümünden elde edilen değer iken, diğer örnek problemler ise farklı senaryo sayıları için çözülmüştür.

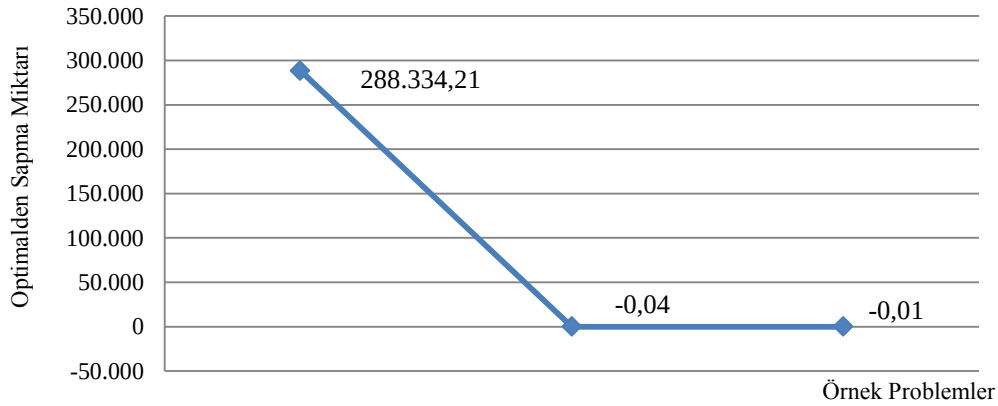
Çizelge 6.18: Farklı senaryo sayıları için elde edilen çözümler.

Örnek Problem	Senaryo Sayısı		Toplam Maliyet (TL)	Tesis Açılma Kararları										
	Miktar	Kalite		j1	j2	j3	j4	j5	j6	j7	k1	k2	k3	k4
1	3	3	3.367.922,877	•	•		•	•		•	•			
2	4	3	3.079.588,629	•	•			•			•			
3	5	3	3.079.588,656	•	•			•			•			
4	6	3	3.079.588,666	•	•			•			•			
5	7	3	Çözüm Yok											
6	10	3	Çözüm Yok											

Şekil 6.12’de farklı senaryo sayıları için elde edilen toplam maliyet değerleri gösterilirken, şekil 6.13 ise sapma miktarlarını grafiksel olarak göstermektedir.



Şekil 6.12: Farklı senaryo sayıları için elde edilen çözümler.



Şekil 6.13: Önerilen model ile farklı sayıda senaryo içeren stokastik model ile arasındaki sapma miktarları.

Yukarıdaki şekillerden açıkça görüldüğü gibi ana model ile farklı sayıda senaryo içeren stokastik modeller arasındaki sapma miktarları farklı seviyelerdedir. En büyük fark pozitif anlamda 288.334,21 TL farkla senaryo sayısı dokuz olan “örnek

problem 1” modeli ile olmuştur. Senaryo sayısının on iki olduğu ikinci problemde optimal çözümden sapma 0,04 TL ve senaryo sayısının on beş olduğu örnek problemde de optimalden sapma 0,01 TL olarak hesaplanmıştır. Senaryo sayısı yirmi bir ve üzerindeki değerler için çözüm bulunamamaktadır. Bunun sebebi maksimum ya da minimum tesis kapasite kısıtlarının sağlanamamasıdır.

6.4 SAA Çözümü

Çalışmanın bu bölümde Monte Carlo tabanlı SAA metodu kullanılarak elde edilen çözümlere yer verilmiştir. Bu yöntemde stokastik programlama modeli ile deterministik modelin çözümleri karşılaştırılmaktadır. Orta değer problemi olarak bilinen deterministik model belirsiz olan miktar ve kaliteyi ifade eden parametrelerin ortalama değerleri kullanılarak elde edilmektedir. SAA uygulaması için istatistiksel amaçlar için yeterince iyi olduğu görüldüğünden her bir örneklem büyüklüğü için tekrar sayısı $M=20$ olarak seçilmiştir (Kiya ve Davoudpour, 2012). Tersine lojistik ağındaki geri dönen miktarının 1055,2 ortalama ve 0,00095 lamda ile üssel dağılıma, kalitenin ise 0,8 ortalama ve 0,025 standart sapma ile normal dağılıma uyduğu tarihsel veriler kullanılarak tespit edilmiştir.

Çalışmada stokastik model için en iyi aday seçilmiş ve bu çözümler için istatistiksel değerler hesaplanmıştır. Bu istatistiksel değerler deterministik çözümle karşılaştırılmıştır. Örneklem büyüklükleri sırasıyla $N= 20, 40$ ve 60 olarak belirlenmiştir. $N'=1000$ için referans örneklem kurulmuştur. Bir başka deyişle, $N'=1000$ ile her bir örneklem için üst sınır değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 6.19, çizelge 6.21 ve çizelge 6.23’ de sırasıyla $N=20, 40$ ve 60 örneklem büyüklükleri için stokastik programlama modelinin birinci aşama sonuçları aktarılmıştır. Çizelge 6.20, çizelge 6.22 ve çizelge 6.24’ de ise sırasıyla $N=20, 40$ ve 60 örneklem büyüklükleri için ortalama değer problemi ve stokastik programlamanın SAA çözümleri aktarılmıştır. Ayrıca bu örneklemelerin amaç fonksiyonu için maksimum, minimum, ortalama değerleri ile varyans değerleri de verilmiştir.

Çizelge 6.19: N=20 için SP modelinin birinci aşama sonuçları.

Tekrar Sayısı	1. Aşama Çözümler		Alt sınır için SAA
	Ayııklama tesisi (yj)	Geri dönüşüm tesisi (zk)	
1	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.815.182,8660
2	[1 1 0 0 0 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.694.091,9600
3	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.434.561,6530
4	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.968.232,7350
5	[1 1 0 1 1 0 1]	[1 0 0 0 0]	2.260.869,1180
6	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.274.824,2170
7	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.423.145,7450
8	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.643.058,8590
9	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.498.601,3400
10	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.064.690,5730
11	[0 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.327.336,8650
12	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.051.133,2410
13	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	981.473,58600
14	[1 0 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.027.441,5990
15	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.677.374,6270
16	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.568.591,2460
17	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.540.607,5120
18	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.570.751,3110
19	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.226.937,8760
20	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.466.592,0600

Burada SAA çözümünde üst sınır değerini hesaplamak için çizelge 6.19’da gösterilen çözümler içerisinde en küçük amaç fonksiyon değerine sahip olan tekrar N’=1000 senaryo için SAA modeline ilk aşama çözüm değerleri olarak girilerek model çözülmüştür. Buna göre N’= 1000 senaryo için SP modeli için üst sınır değeri belirlerken on üçüncü tekrar çözümü birinci aşama çözüm değerleri olan bir, iki ve beş numaralı AT ’lerin ile bir numaralı GDM ’nin açılacağı verisi modele girilerek çözüm yapılmıştır. Bu şekilde SP modelinin üst sınır çözümü elde edilmiştir. Bölüm 4.2 ‘de tarif edilen SAA çözüm aşamaları uygulanarak çizelge 6.20’deki değerler hesaplanmıştır.

Çizelge 6.20: N=20 için SAA sonuçları.

Tekrar	Z^{ODP}	Z^{N=20}
1	1.524.046,82	1.815.182,87
2	1.410.682,74	1.694.091,96
3	1.194.424,85	1.434.561,65
4	1.650.406,47	1.968.232,74
5	1.720.686,11	2.260.869,12
6	1.178.770,84	1.274.824,22
7	1.198.192,89	1.423.145,75
8	1.374.280,56	1.643.058,86
9	1.252.308,17	1.498.601,34
10	1.055.848,99	1.064.690,57
11	1.031.838,50	1.327.336,87
12	1.723.656,96	2.051.133,24
13	939.399,50	981.473,5900
14	961.241,42	1.027.441,60
15	1.418.350,87	1.677.374,63
16	1.301.536,45	1.568.591,25
17	1.293.251,34	1.540.607,51
18	1.314.347,33	1.570.751,31
19	1.132.843,20	1.226.937,88
20	1.227.353,21	1.466.592,06
Minimum	939.399,50	981.473,59
Maksimum	1.723.656,96	2.260.869,12
Ortalama (Alt sınır)	1.295.173,36	1.525.774,95
Varyans	5,31E+10	1,06849E+11
Standart Sapma	230.447,83	326.878,065
Üst sınır	1.313.405,41	1.582.576,24
Varyans	-	1,25E+11
Standart Sapma	-	354.096,032
Optimal Boşluk	18.232,05	56.801,29
%Boşluk	1%	3,59%
Varyans	5,31E+10	1,2538E+11
Standart Sapma	230.447,83	354.096,19

N=40 senaryo için elde edilen SAA çözümleri çizelge 6.21 ve çizelge 6.22’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.21: N=40 için SP modelinin birinci aşama sonuçları.

Tekrar Sayısı	1. Aşama Çözümler		Alt sınır için SAA
	Ayıklama tesisi (yj)	Geri dönüşüm tesisi (zk)	
1	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.511.191,0850
2	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.485.937,1160
3	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.376.478,1700
4	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.386.688,3540
5	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.448.477,1290
6	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.294.439,1040
7	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.472.016,9470
8	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.436.988,1200
9	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.673.830,2900
10	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.397.793,4900
11	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.284.581,5120
12	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.232.528,5190
13	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.177.981,9840
14	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.307.002,3170
15	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.331.791,7600
16	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.786.651,2640
17	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.209.880,9980
18	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.221.401,4130
19	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.364.368,2430
20	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.380.594,3560

Buna göre yukarıda açıklanan yaklaşımla N’ 1000 senaryo için SP modeli için üst sınır değeri belirlerken on üçüncü tekrar çözümü birinci aşama çözüm değerleri olan bir, iki ve beş nolu AT ile bir nolu GDM lokasyonlarının açılacağı verisi modele girilerek çözüm yapılmıştır. Bu şekilde SP modelinin üst sınır çözümü elde edilmiştir. Bölüm 4.2 ‘de tarif edilen SAA çözüm aşamaları uygulanarak çizelge 6.22’deki değerler hesaplanmıştır.

Çizelge 6.22: N=40 için SAA sonuçları.

Tekrar	Z^{ODP}	Z^{N=40}
1	1.259.731,64	1.511.191,09
2	1.243.025,29	1.485.937,12
3	1.160.928,57	1.376.478,17
4	1.162.174,02	1.386.688,35
5	1.216.968,13	1.448.477,13
6	1.084.749,33	1.294.439,10
7	1.289.906,93	1.472.016,95
8	1.195.474,63	1.436.988,12
9	1.391.605,21	1.673.830,29
10	1.184.337,07	1.397.793,49
11	1.119.278,39	1.284.581,51
12	1.080.858,67	1.232.528,52
13	1.042.804,86	1.177.981,98
14	1.095.055,95	1.307.002,32
15	1.104.458,94	1.331.791,76
16	1.559.045,01	1.786.651,26
17	1.011.161,73	1.209.881,00
18	1.033.710,64	1.221.401,41
19	1.192.572,47	1.364.368,24
20	1.156.519,33	1.380.594,36
Minimum	1.011.161,73	1.177.981,98
Maksimum	1.559.045,01	1.786.651,26
Ortalama (Alt sınır)	1.179.218,34	1.389.031,11
Varyans	9,44E+09	2,30E+10
Standart Sapma	97.167,663	151.528,62
Üst sınır	1.215.914,90	1.436.047,46
Varyans	-	8,90E+11
Standart Sapma	-	298.293,312
Optimal Boşluk	69.803,12	47.016,35
%Boşluk	0,06	3,274%
Varyans	9,442E+09	8,8979E+11
Standart Sapma	97.167,66	298.293,350

N=60 senaryo için elde edilen SAA çözümleri çizelge 6.23 ve çizelge 6.24'te gösterilmektedir.

Çizelge 6.23: N=60 için SP modelinin birinci aşama sonuçları.

Tekrar Sayısı	1. Aşama Çözümler		Alt sınır için SAA
	Ayıklama tesisi (yj)	Geri dönüşüm tesisi (zk)	
1	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.587.164,2360
2	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.502.946,8050
3	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.268.329,4520
4	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.339.718,5090
5	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.150.898,3190
6	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	966.851,83300
7	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.432.248,0800
8	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.472.115,5740
9	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.367.597,7930
10	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.485.064,1690
11	[1 1 0 0 0 0 1]	[1 0 0 0 0]	1.395.501,7730
12	[1 1 0 0 0 0 1]	[1 0 0 0 0]	1.328.372,4250
13	[0 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.471.261,2240
14	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.335.143,9030
15	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.321.848,8310
16	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.275.866,4900
17	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.360.908,1420
18	[0 1 0 0 1 0 1]	[1 0 0 0 0]	1.412.396,3700
19	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.351.966,3260
20	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.262.827,5030

Buna göre N' 1000 senaryo için SP modeli için üst sınır değeri belirlerken altıncı tekrar çözümü birinci aşama çözüm değerleri olan bir, iki ve beş nolu AT ile bir nolu GDM lokasyonlarının açılacağı verisi modele girilerek çözüm yapılmıştır. Bu şekilde SP modelinin üst sınır çözümü elde edilmiştir. Bölüm 4.2 'de tarif edilen SAA çözüm aşamaları uygulanarak çizelge 6.24'deki değerler hesaplanmıştır.

Çizelge 6.24: N=60 için SAA sonuçları.

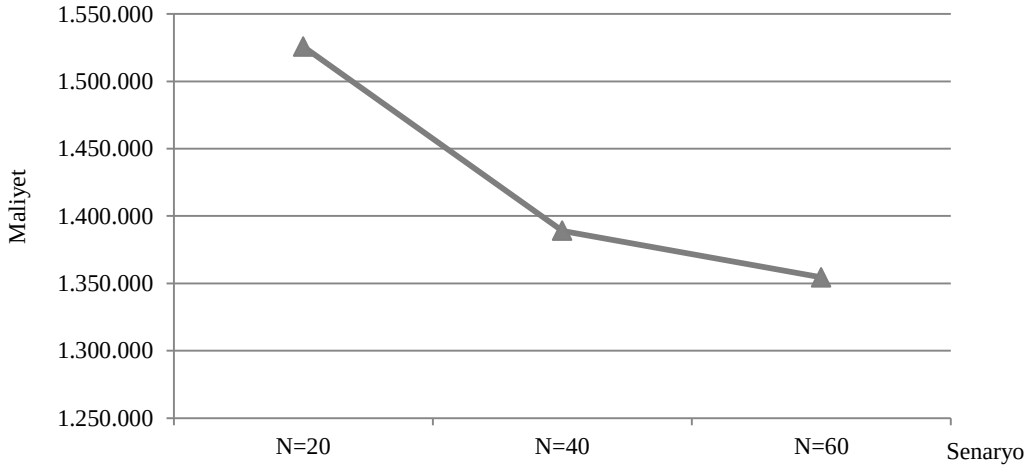
Tekrar	Z^{ODP}	Z^{N=60}
1	1.318.374	1.587.164,24
2	1.238.377	1.502.946,81
3	1.063.303	1.268.329,45
4	1.123.271	1.339.718,51
5	964.746	1.150.898,32
6	889.521	966.851,83
7	1.203.970	1.432.248,08
8	1.230.638	1.472.115,57
9	1.136.115	1.367.597,79
10	1.235.806	1.485.064,17
11	1.079.036	1.395.501,77
12	1.073.163	1.328.372,43
13	1.140.284	1.471.261,22
14	1.119.100	1.335.143,90
15	1.150.125	1.321.848,83
16	1.117.380	1.275.866,49
17	1.130.743	1.360.908,14
18	1.095.134	1.412.396,37
19	1.178.557	1.351.966,33
20	1.054.700	1.262.827,50
Minimum	889.521,44	966.851,83
Maksimum	1.318.374,44	1.587.164,24
Ortalama (Alt sınır)	1.127.117,16	1.354.451,39
Varyans	9,44E+09	1,83E+10
Standart Sapma	97.167,66	135.347,25
Üst sınır	1.167.301,42	1.381.730,38
Varyans	-	8,53E+10
Standart Sapma	-	292.118,297
Optimal Boşluk	40.184,27	27.278,99
%Boşluk	0,03	1,974%
Varyans	9,44E+09	8,5333E+10
Standart Sapma	97.167,66	292.118,329

Çizelge 6.25’te N=20, 40 ve 60 örneklem büyüklükleri için elde edilen değerler özet olarak gösterilmiştir.

Çizelge 6.25: Farklı senaryo sayıları için SAA çözümü özeti.

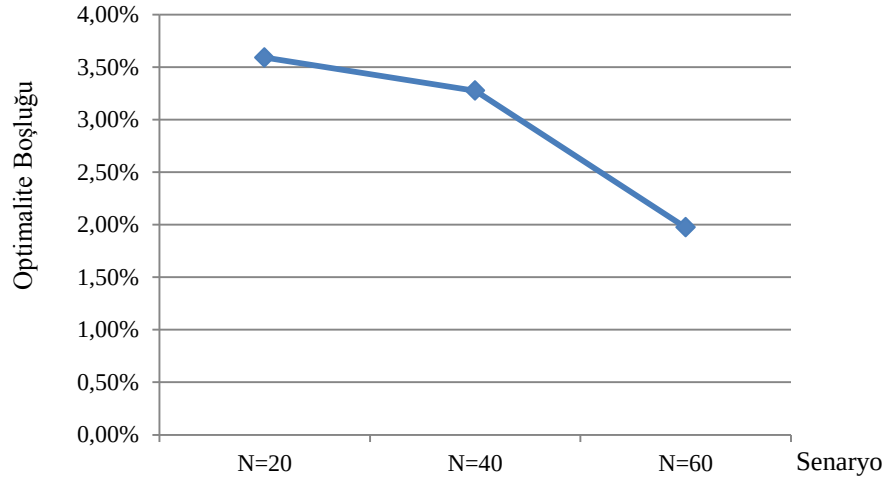
	N=20	N=40	N=60
Alt sınır	1.525.774,95	1.389.031,11	1.354.451,39
Üst sınır	1.582.576,24	1.436.047,46	1.381.730,38
Optimal Boşluk	56.801,29	47.016,35	27.278,99
% Optimal Boşluk	3,59%	3,274%	1,974%
Standart Sapma	354.096,1909	298.293,350	292.118,329

Şekil 6.14’te farklı senaryo sayıları için yapılan SAA çözüm değerleri gösterilmektedir. Buna göre senaryo sayısı arttıkça amaç fonksiyon değeri düşmektedir.



Şekil 6.14: Farklı senaryo için yapılan SAA çözümleri optimal değer değişimi.

Bilindiği gibi SAA çözümlerinin kalitesinin belirlenmesinde amaç fonksiyon değerini ifade eden alt sınır değeri tek başına yeterli olmamaktadır. Bunun yanında optimalite boşluğu değerinin de küçük olması istenmektedir. Şekil 6.15’te N=20, 40 ve 60 senaryo büyüklükleri için yapılan çözümlere ait optimalite boşluğu değerleri görülmektedir. Buna göre en küçük optimalite boşluğu değeri 1,974% ile N=60 senaryo için yapılan çözümde elde edilmiştir.



Şekil 6.15: Farklı senaryo için yapılan SAA çözümlerinin optimalite boşluğu değişimi.

SAA metodunun yakınsama gerçekliği örneklem büyüklüğüne bağlı olduğu bilinen bir gerçektir (Long ve diğ., 2012). Bunun için bu çalışmamızda bu durumu dikkate alarak değişen örneklem büyüklükleri için çözümler yapılmıştır. Açıkça görüldüğü gibi stokastik çözümler ortalama maliyetten çok daha küçüktür. Yukarıdaki çizelgelerde görülebileceği üzere örneklem sayısı büyüdükçe standart sapma değeri azalmaktadır. Ayrıca örneklem sayısı artışı ile beraber ortalama maliyet düşmekte, üst sınır ve alt sınır arasındaki optimalite boşluğu da düşmektedir. Buna göre en iyi çözüm N=60 örneklem büyüklüğü için elde edilmiştir. Aynı şekilde N=60 için en küçük standart sapma değeri hesaplanmıştır. Küçük optimalite boşluğu çözüm kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir (Long ve diğ., 2012). Çizelge 6.20, çizelge 6.22 ve çizelge 6.24'deki sonuçlardan en küçük optimalite boşluk 1,974 % ile N=60 örneklem büyüklüğü için elde edilmiştir. Sonuçlara göre uygun ve iyi çözümler elde edebilmek için senaryo sayısının hesaplanan varyans değerinin yeteri kadar küçük olmasını sağlayacak şekilde artırılması gerektiği görülmektedir. Elde edilen sonuçların %90 ve %99 güven aralığı için yapılan t-testlerinde anlamlı olduğu görülmektedir. Bu metot kullanılarak elde edilen sonuçlara göre geliştirilen stokastik model deterministik modellere göre daha kabul edilebilir ve daha iyi sonuçlar vermektedir. Buradan geliştirilen SP' nin belirsizliklerle başa çıkmada kullanılabilir bir model olduğu ortaya çıkmaktadır.

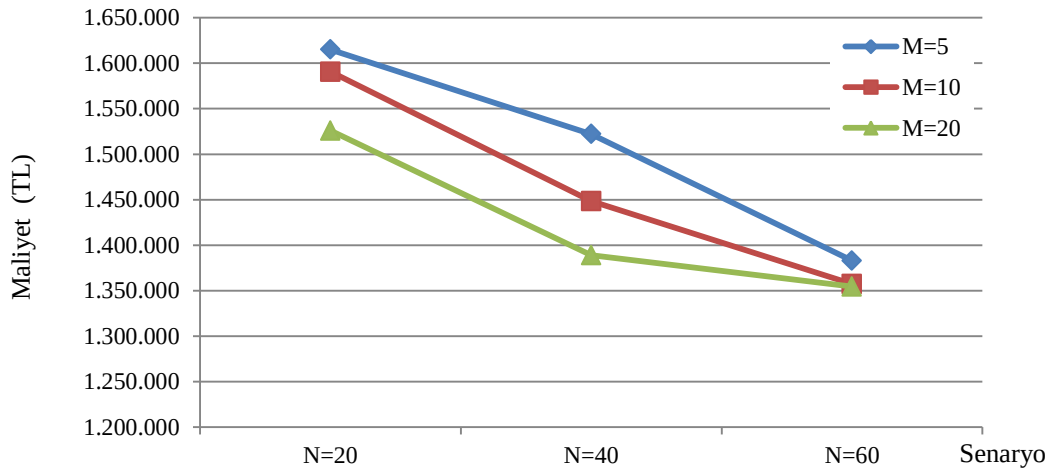
6.4.1 SAA çözümü analizi

Stokastik programlama modeli çözümü için geliştirilen SAA yönteminin çözüm kalitesini ölçmek için farklı örneklem sayıları (tekrar sayısı) ve senaryo büyüklükleri için çözümler yapılmıştır. Elde edilen optimal değer ve çözümler çizelge 6.26'da aktarılmıştır.

Çizelge 6.26: Farklı tekrar sayısı ve senaryo büyüklükleri için SAA çözümleri.

Tekrar Sayısı	Problem Boyutu			Senaryo Sayısı	Amaç Fonksiyon Değeri (Alt sınır değeri)	Çözümler	
	Toplama Noktası	Ayıklama Tesisi	Geri Dönüşüm Tesisi			Ayıklama Tesisi	Geri Dönüşüm Tesisi
5	28	7	5	20	1.614.976,82	j1,j5	k1
				40	1.522.093,34	j1,j2,j5	k1
				60	1.383.072,28	j1,j2,j5	k1
10	28	7	5	20	1.590.599,46	j1,j2,j5	k1
				40	1.448.383,98	j1,j2,j5	k1
				60	1.357.293,48	j1,j2,j5	k1
20	28	7	5	20	1.525.774,95	j1,j2,j5	k1
				40	1.389.031,11	j1,j2,j5	k1
				60	1.354.451,39	j1,j2,j5	k1

Şekil 6.16'da farklı örneklem sayıları (tekrar sayısı) ve senaryo büyüklükleri için amaç fonksiyonu değerindeki değişim görülmektedir.



Şekil 6.16: Farklı örneklem sayıları (tekrar sayısı) ve senaryo büyüklükleri için amaç fonksiyonu değerindeki değişim.

Analiz sonuçlarına göre TLAT için önerilen stokastik programlama modelinin çözümünde kullanılan SAA yöntemi için iki kritik parametre olan örneklem sayısı ve örneklemi oluşturan senaryo sayısı değerlerinin amaç fonksiyonu üzerindeki etkisini analiz etmek için bir takım testler yapılmıştır. Analiz sonuçları genel olarak örneklem büyüklüğü ve senaryo sayısındaki artışın amaç çözüm kalitesini arttığını

göstermektedir. Şekil 6.16 bizlere altmış senaryo için örneklem sayısının on ve yirmi olması durumlarında birbirine çok yakın amaç fonksiyonu değerleri elde edildiğini göstermektedir. Buna göre örneklem ve senaryo sayısının çözüm süresini uzattığı gerçeğinden yola çıkarak ele alınan problem için on örneklem sayısının altmış senaryo için iyi çözüm verdiğini göstermektedir.

6.5 Monolitik SP Yaklaşımı ve SAA Yönteminin Karşılaştırılması

Bu bölümde TLAT problemi için önerilen monolitik SP modeli ile SAA yaklaşımının sonuçları karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.27 'ye görüleceği üzere monolitik SP modelinin amaç fonksiyon değeri 3.079.588,666 TL 'dir. Monolitik yaklaşımın aksine çok sayıda senaryo kullanılarak çözülen SAA yaklaşımında ise amaç fonksiyonu 1.354.451,39 TL olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre SAA yaklaşımının belirsizlikler altındaki TLAT probleminin çözümünde oldukça iyi bir performans gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 6.27: SP modeli çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması.

Model	Amaç Fonksiyonu	Ayıklama Merkezi							Geri Dönüşüm Merkezi				
		j1	j2	j3	j4	j5	j6	j7	k1	k2	k3	k4	k5
Monolitik SP Modeli (18 senaryo için)	3.079.588,666	•		•		•			•				
SP modeli için SAA yaklaşımı (60 senaryo için)	1.354.451,390	•	•			•			•				
18 senaryo için SAA yaklaşımı	1.491.862,000	•	•			•			•				

Bununla beraber SAA yaklaşımının az sayıda senaryo ile çözülen monolitik SP modeline göre çözüm performansını daha açık bir şekilde ortaya koyabilmek için ilk yaklaşımda elde edilen birinci aşama sonuçları SAA yaklaşımına girdi olarak verilerek, ilk yaklaşım ile aynı sonuçları bulması halinde SAA yaklaşımından elde edilecek amaç fonksiyon değeri hesaplanmak istenmiştir. Çizelge 6.28'de SAA yaklaşımının monolitik SP birinci aşama sonuçları ile çözüm değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.28: SAA yaklaşımının monolitik SP birinci aşama sonuçları ile çözümü.

Tekrar Sayısı	1. Aşama Çözümler		Alt sınır için SAA
	Ayıklama tesisi (yi)	Geri dönüşüm tesisi (zk)	
1	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	3.141.755,513
2	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	3.115.241,625
3	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.625.275,569
4	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.761.243,379
5	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.357.082,527
6	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	1.297.113,830
7	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.911.279,433
8	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.979.136,430
9	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.750.904,761
10	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.953.508,028
11	[1 1 0 0 0 0 1]	[1 0 0 0 0]	2.675.322,770
12	[1 1 0 0 0 0 1]	[1 0 0 0 0]	2.510.153,032
13	[0 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	3.001.856,515
14	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.704.599,049
15	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.658.511,541
16	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.568.909,213
17	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.989.678,281
18	[0 1 0 0 1 0 1]	[1 0 0 0 0]	2.635.442,358
19	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.731.332,012
20	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.540.282,843
Ortalama	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.695.431,440
Üst sınır	[1 1 0 0 1 0 0]	[1 0 0 0 0]	2.795.757,352

Çizelge 6.27 ve çizelge 6.28’da görüldüğü gibi monolitik SP modeli ile aynı birinci aşama sonuçlarına sahip olan SAA yaklaşımı yine oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Yirmi tekrarlı, bir başka deyişle yirmi kez birbirinden farklı altmış senaryo oluşturularak çözülen SAA yaklaşımı on dokuz çözümde monolitik SP çözümünden daha düşük toplam maliyet değerine sahiptir. Ortalama değer olarak da 2.695.431,440 TL değeri ile monolitik SP çözümüne göre (3.079.588,666 TL) %14 daha düşük maliyet değeri vermiştir. Buna göre SAA metodu belirsizlikler altında TLAT problemi için oldukça monolitik SP modellerine ve deterministik modellere göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

6.5 Geçerlilik ve Duyarlılık Analizleri

6.5.1 Geliştirilen modelin geçerlilik testi

Geliştirilen deterministik ve SP’ nin geçerliliğini göstermek amacıyla başvuru bir diğer yöntem çözüm üzerinde direkt etkisi olduğu düşünülen parametrelere uç değerler verilerek modellerin beklenen sonuçları verip vermediğini gözlemlemektir. Bu yöneme uç değer analizi adı verilmektedir.

6.5.1.1 Geri dönüşün olmadığı durum

Geri dönen ürün olmaması durumunda geliştirilen modelde ayıklama ve geri dönüşüm tesislerinin açma-kapama kararları ile tesisler arası ürün taşıma kararlarının nasıl sonuçlandığı incelenmiştir. Geri dönen ürün olmaması durumunda modellerden beklenen atık toplamakta kullanılan ve müşterilerin uygun gördükleri yerlere yerleştirilmiş olan konteynerlerin sabit maliyetlerinin ve reklam giderlerinin toplamı olan maliyeti vermesidir. Sonuçlarda beklenildiği gibi önerilen modeller toplama noktaları ve reklam giderleri toplamı olan 71.800 TL maliyet hesaplamışlardır.

6.5.1.2 Tesis kapasitelerinin sıfır ve çok yüksek olduğu durumlar

Bu analiz için ayıklama ve geri dönüşüm tesislerinin kapasitelerinin hem sıfır hem de çok yüksek olduğu ya da kapasite kısıtsız olduğu durumlar için modeller çalıştırılmıştır. Kapasitenin sıfır olması durumunda geliştirilen modelde ayıklama ve geri dönüşüm tesislerinin açma kararları ile tesisler arası ürün taşıma kararlarının nasıl sonuçlandığı incelenmiştir. Kapasitenin sıfır olması durumunda modellerden beklenen atık toplamakta kullanılan ve müşterilerin uygun gördükleri yerlere yerleştirilmiş olan konteynerlerin sabit maliyetlerinin ve reklam giderlerinin toplamı olan maliyeti vermesidir. Sonuçlarda beklenildiği gibi önerilen modeller toplama noktaları ve reklam giderleri toplamı olan 71.800 TL maliyet hesaplamışlardır. Kapasite kısıtının olmaması durumunda ise deterministik model için 2.566.690,904 TL ve SP için 2.566.323,049 TL maliyet hesaplanmıştır.

6.5.2 Duyarlılık analizi

Bu bölümde bazı parametrelerdeki değişimin amaç fonksiyonu değeri üzerindeki etkisini gözlemlemek maksadıyla bir takım duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu maksatla tesis kapasiteleri, geri dönen ürün miktarı, değişken maliyetler ve atık toplama maliyeti gibi parametrelerin amaç fonksiyonundaki etkilerini görmek için aşağıdaki analizler yapılmıştır.

6.5.2.1 Tesis kapasitelerindeki değişimin amaç fonksiyonuna etkisi

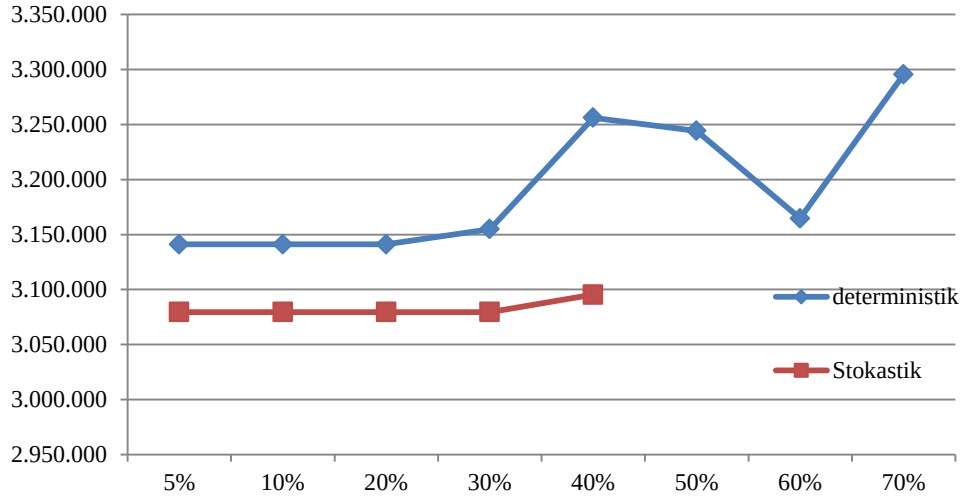
Bu çalışmada kapasite kısıtı altında TL ağı tasarlanmıştır. Çizelge 6.29’de tesis kapasitelerinin stokastik model ve deterministik model için 5% ‘den 70%’e kadar azaltılması durumunda amaç fonksiyonundaki değişimler görülmektedir. Bu analizle optimal çözümün açılmasını önerdiği tesislerin açılması durumunda, tesislerin

kapasite değerlerinde ne kadarlık bir değişim olması halinde geri dönüş miktarının karşılanabildiği ve optimal çözüm elde edilebildiği ortaya konmuştur.

Şekil 6.17 'de görüldüğü gibi stokastik model için 10% kapasite azaltımından sonra amaç fonksiyon değeri olan toplam maliyetlerde artış görülmektedir. Fakat tesis kapasitelerindeki azaltma 30% seviyesinin üzerine çıktığında amaç fonksiyonu için fizibil çözüm bulunamamaktadır. Dolayısıyla geliştirilen stokastik model için optimal çözüm sınırı kapasite seviyesinin %30 azaltılmasına kadar elde edilebilmektedir. Bu seviye için toplam maliyette 1% 'lük 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 6.17 'te görüldüğü özellikle %60 seviyesinde sonra maliyetlerde artma olmaktadır. Bunun nedeni olarak ülkemizde mevcut durumda toplanan atık miktarının tesis kapasitelerinin çok altında olmasıdır ki %60 kapasite düşüşü seviyesine kadar amaç fonksiyon seviyesi değişmemektedir. %70 kapasite düşüşü için elde edilen amaç fonksiyonu ile ilk durumdaki değer arasında 7% 'lük bir artış görülmektedir. Sonuç olarak grafikler stokastik modelin kapasite değişimlerine karşı daha hassas olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.29: Kapasite azaltmanın toplam maliyete etkisi.

Kapasite azalma oranı	Stokastik (TL)	Deterministik (TL)
5%	3.079.589	3.141.058
10%	3.079.589	3.141.058
20%	3.079.589	3.141.058
30%	3.079.589	3.154.951
40%	3.095.452	3.256.074
50%	-	3.244.174
60%	-	3.164.651
70%	-	3.295.391
80%	-	-



Şekil 6.17: Toplam maliyet ve tesis kapasiteleri ilişkisi.

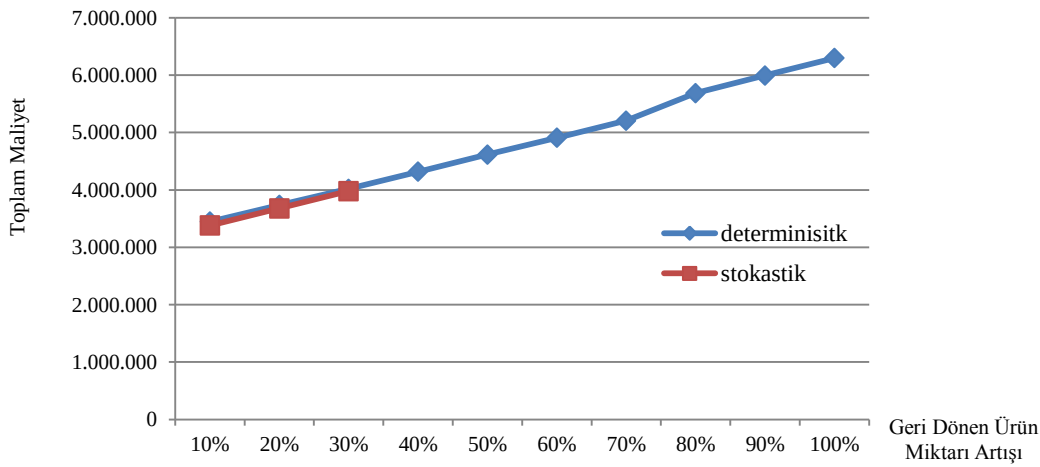
6.5.2.2 Geri dönen e-atık miktarında değişimin amaç fonksiyonuna etkisi

İkinci olarak geri dönen e-atık miktarında meydana gelecek değişimler için, mevcut en uygun çözümün açılmasını önerdiği tesislerin yeterliliğinin sınırlarını belirlemeye yönelik duyarlılık analizi yapılmıştır. Bunun için toplama noktalarındaki geri dönen miktarları çizelge 6.30’da görülen oranlarda artırılmış ve bunun amaç fonksiyonu üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 6.18’de açıkça görüldüğü gibi önerilen stokastik model için geri dönen ürün miktarı sırasıyla %10, % 20 ve % 30 oranında artırılmıştır.

Geri dönen ürün miktarındaki artış %30 seviyesini geçmesi durumunda fizibil çözüm bulunamamaktadır. Çünkü optimal çözümde önerilen açılan tesislerin mevcut tesis kapasiteleri bu seviye üzerindeki artışı kaldıramamaktadır. Gelen e-atık miktarında %30’a kadar olan artış seviyesini firma yeni bir tesis açma ihtimali olmadan karşılayabilmektedir. %30’luk geri dönüş artışı firmanın amaç fonksiyon değerinde %23’lük artışa sebep olmaktadır. Deterministik model açısından bakıldığında geri dönen ürün miktarı %10’dan %100’e kadar artırılmıştır. Bu sonuçlara göre, deterministik modelde geri dönüş miktarındaki artışın %100’ü geçtiği durumda fizibil çözüm bulunamadığı için yeni tesis açılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. %100’lük geri dönüş artışı firmanın amaç fonksiyon değerinde %51’lik artışa sebep olmaktadır.

Çizelge 6.30: Geri dönen e-atık miktarında değişimin toplam maliyete etkisi.

E-atık artış oranı	Stokastik (TL)	Deterministik (TL)
10%	3.379.430	3.446.599
20%	3.679.271	3.738.318
30%	3.979.113	4.019.358
40%	-	4.316.389
50%	-	4.615.164
60%	-	4.909.253
70%	-	5.208.732
80%	-	5.686.439
90%	-	5.993.261
100%	-	6.299.598
200%	-	-



Şekil 6.18: Toplam maliyet ve geri dönen e-atık miktarı.

6.6 Çalışmada Kullanılan Metotların Güçlü-Zayıf Yönleri ve Çalışmanın Kısıtları

Bu çalışmada kullanılan metotların bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Çalışmada belirsizlikleri ele almada stokastik programlama metodu kullanılmıştır.

Deterministik modellerde daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi model parametreleri bilinmektedir. Model parametrelerinden bazılarında belirsizlik ya da değişimlere karşı aşırı duyarlılık olursa bu durumda stokastik programlama bu tür etkilerle başa çıkmakta daha etkili olmaktadır (Sen ve Hingle, 1999; Sodhi ve Tang, 2009). Stokastik programlamada belirsiz parametreyi ifade etmekte kullanılan herbir senaryonun gerçekleşme olasılığı bulunmaktadır. Bu ise diğer senaryo ve simülasyon tekniklerine göre daha gerçekçi bir yaklaşım ortaya koymaktadır (Shapiro, 2004).

Stokastik programlama modeli ile tüm farklı tahminler bir karar verme modelinde toplanabilmektedir (Sen ve Hagle, 1999).

Çok sayıda senaryo, kısıt, uzun çözüm süresi gibi model yapısındaki karmaşıklık stokastik programlamanın kısıtları arasında yer almaktadır (Chanintrakul ve diğ., 2009). Bir de stokastik programlama model formülasyonunu çözüm algoritmasından ayırmaktadır (Khor, 2006).

Stokastik modelleme belirsizlikleri ifade etmekte iyi bir seçim iken model parametrelerindeki değişim karar değişkenleri ve kısıt sayısında büyük artışa sebep olmakta bu ise modeli ve çözümü karmaşık hale getirmektedir (Sodhi ve Tang, 2009).

Stokastik programlamada belirsizlikler senaryolarla ifade edilirken karar vericinin riske bakış açısına göre iyimser, kötümser yada nötr şeklinde farklı yaklaşımlar ortaya konulabilmektedir. Dolayısıyla her bir durum için sonuçlar farklılık arz edeceğinden çözümlerin her bir yaklaşım için ayrı ayrı yapılması karar süreci açısından daha iyi bir yaklaşımdır (Wets, 1996). Bu çalışmada ise nötr davranış usulü benimsenmiş ve senaryo oluşturulurken ortalama değerler dikkate alınmıştır.

Stokastik programlamada belirsiz parametreler olasılık dağılımları ile ifade edildiğinden bu parametrelere ilişkin geçmiş verilerden faydalanılarak olasılık dağılımları elde edilmektedir. Bu durumda ise belirsizliğin iyi bir şekilde ifade edilebilmesi için elde geçmişe yönelik yeterli sayıda veri olması belirsiz parametrelerin daha sağlıklı temsil edilebilmesini sağlayacaktır. Bu hususta ülkemizde AEEE geri dönüşümüne ilişkin yasal toplama miktarlarının kayıt altına alınması sürecine henüz yeni başladığı için dönemsel veri bulma sıkıntısı vardır. Bunun için önümüzdeki yıllarda daha fazla veri ile daha sağlıklı sonuçlar elde edilebilecektir.

Stokastik modellemede sonucun değeri ya da mükemmel bilginin değeri tamamen karar vericinin bakış açısına göre bir değer ifade etmektedir.

Bu çalışmada önerilen stokastik programlama modelinin çözümünde iki yaklaşım uygulanmıştır. İlk yaklaşımda az sayıda senaryo ile optimum çözüm bulunmaya çalışılmıştır. Burada alternatif bir yaklaşım olarak uygulanmaya başlanan belirsiz parametreye ait sürekli olasılık dağılımı kesikleştirilerek sınırlı sayıda senaryo oluşturulmuş ve problem deterministik eşdeğer forma dönüştürülerek optimal çözüm

bulunmuştur (Al-Qahtani ve Elkamel, 2010; Karuppiah ve diğ, 2010). Bu şekilde basit bir yaklaşımla karmaşık bir yapıya sahip olan SP modeli için optimal çözüme ulaşılmıştır. İkinci yaklaşımda ise çok sayıda senaryo için optimal çözümden ziyade yaklaşık çözümün elde edildiği örneklem yakınsama yaklaşımı kullanılmıştır. SAA yaklaşımı stokastik tesis yerleşim ve ağ tasarım problemlerinin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Aydın ve Murat, 2013).

Örneklem yakınsama yaklaşımı büyük ölçekli stokastik programlama problemlerini çözmekte kullanılan en yaygın tekniklerden biridir (Aydın ve Murat, 2013). Örneklem büyüklüğü yeterince büyük olması durumunda optimale yakın sonuçlar elde edilmektedir (Ahmed ve Shapiro, 2002).

SAA’ da örneklem sayısı artışı ile çözüm kalitesi artmaktadır. Fakat bu durumda çözüm süresi üssel olarak artış göstermektedir ki bu da çözme hızı etkinliğinde düşüş demektir. (Greenwald ve diğ, 2006; Schütz ve diğ, 2009) Bu çalışmada çözüm için GAMS optimizasyon programı kullanıldığı için problemi karmaşık hale getirecek olan yaklaşımlardan kaçınılmıştır. Senaryo sayısının N=1000’den büyük olması durumunda kullanılan çözüm metodu fizibil çözüm veremediği için sezgisel bir yaklaşım kullanılması gerekmektedir.

Büyük sayıda senaryo içeren problemlerin çözümü karmaşık olmaktadır. Bu tür problemler için tercih edilen yaklaşım senaryo azaltma tekniklerinin kullanımıdır (Karuppiah ve diğ, 2010). Çalışmamızda sonuca kısa makul bir süre içinde ulaşıldığı için senaryo azaltma teknikleri kullanılmamıştır.

Örneklem yakınsama yaklaşımında bazı durumlarda gerçek bir yakınsama olmamakta ve bu durum zaman kaybına sebep olmaktadır (Lee ve diğ, 2010).

6.6.1 Çalışmanın kısıtları

Bu çalışmada sektöre yeni girecek olan firmalar göz önüne alındığı için tesislerin genişletilme kararı ve mevcut tesisin kapatılma kararları önerilen deterministik ve stokastik modele dahil edilmemiştir.

Geliştirilen genel GDAT modelinin uygulanmasında gerçek veriler kullanılmaya çalışılmıştır. Ancak ülkemizde AEEE sektöründe henüz resmi bir yönetmelik yürürlüğe girmediği için, lisanslı AEEE geridönüşüm firma sayısı çok kısıtlıdır. Bundan dolayı toplanan AEEE ile ilgili kontrollü verilere ulaşmak çok zordur. AEEE

geridönüşüm süreci ile ilgili son kullanıcılardan ziyade sürece dahil olan aktörlerin bilgi seviyeleri ve farkındalıkları oldukça düşük olduğundan toplanan AEEE miktarı düşük seviyelerdedir.

Belirsiz parametrelerden biri olan geri dönen e-atık miktarına ilişkin olasılık dağılımı uygulama yapılan firmanın son birkaç yıllık kayıtları kullanılarak oluşturulmuştur. Burada ise eldeki veri sayısının daha fazla olması belirsizliğin daha iyi ifade edilmesinde yardımcı olacaktır.

TLAT yazın taraması çalışmasında, sadece İngilizce yazılan ve uluslar arası indeksli yayınlarda yayımlanan makaleler dikkate alınmıştır. Çalışmada model geliştirilirken tezler, kitaplar ve akademik olmayan makaleler kapsam dışı tutulmuştur.

7. SONUÇLAR

Son zamanlarda, ekonomik, çevresel faktörler, hükümetlerin koydukları kanunlar, yasal düzenlemeler ve sosyal sorumluluklar gibi sebeplerden dolayı firmalar tersine lojistik faaliyetlerini sistemlerine entegre etmek durumunda kalmışlardır. Tersine lojistik faaliyetlerinin yerine getirildiği tesislerin kurulum maliyetlerinin yüksek olması firmaları bu tür faaliyetleri dışarıya üçüncü parti firmalara vermek zorunda bırakmaktadır. Bu önemli faktörden dolayı son yıllarda üçüncü parti tersine lojistik hizmeti veren firma sayısında dikkati çeken bir artış yaşanmaktadır. Bu durumun neticesinde üçüncü parti tersine lojistik firmaları için, genel olarak tüketicilerden kullanılmış ürünlerin toplanması, depolanması, yeniden işlenmesi, bertaraf ve tamir edilmesi vb. faaliyetlerini içeren etkin bir tersine lojistik ağının tasarlanması problemi ile karşı karşıya kalmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan GDAT kapsamında potansiyel AT ve GDM 'ler için en uygun lokasyonun seçimi ve ağ içindeki tesisler arasında taşınacak ürün miktarlarının belirlenmesi kararları alınmaktadır. Çalışmada GDAT için model geliştirilirken detaylı bir yazı taraması yapılmıştır. Bu kapsamda 69 tane deterministik model içeren, 23 adet stokastik programlama ve 3 adet robust programlamanın önerildiği toplam 95 çalışma incelenmiştir. Yazında çalışmalarında yapılan detaylı analizler neticesinde gerçek hayat koşulları gereği olarak GDAT sürecinin geri dönen atık miktarı, kalitesi ve zamanı başta olmak üzere işleme maliyeti, taşıma maliyeti, toplama maliyeti, hammadde pazarları ya da ikinci el ürün pazarlarında satış maliyeti vb. birçok belirsiz parametreyi bünyesinde barındırdığı tespit edilmiştir. Özellikle tersine lojistik ağlarının stratejik tasarımında belirsizlik dikkate alınması gereken bir husustur. Belirsizlik kavramı parametrelerin kesin olarak belirlenmesinin zor olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Modeldeki bazı veya tüm parametreler belirsiz olduğu problemlere stokastik programlama problemleri adı verilir (Hillier ve Lieberman, 2001). Stokastik programlamanın temelinde işlenen konu, problemle ilgili olan değişkenlerin kullanılmasıyla belirsizliğin ifade edilmesidir. Deterministik programlama modelleri belirsizlikleri

göz önüne almadığı için gerçek hayat uygulamalarını doğru bir şekilde yansıtamamaktadır (Dantzig ve Infanger, 2011).

Buradan hareketle belirsizliğin GDAT için en temel özelliklerden olduğu görülmektedir. Bununla birlikte yazında belirsizlikler altında tersine lojistik ağ tasarımı ele alan stokastik programlama modeli ile yapılan çalışmaların çok az sayıda olduğu dikkati çekmektedir. Bu çalışmalarda ise stokastik programlama modelinin yapısındaki karmaşıklığı önlemek ve çözüm sürecini basite indirmek için tek ürün ve tek belirsizlik varsayımları altında çalışmalar yoğunlaştırılarak gelecekteki çalışmaların gerçek hayat koşullarına uygun olarak çok ürün ve çok belirsizlik içeren çalışmalar olması gerektiği vurgulanmıştır.

Bu çalışmada belirsizlikler altında tersine lojistik ağ tasarımı problemi ele alınarak iki aşamalı stokastik programlama modeli geliştirilmiştir. Önerilen model geri dönen ürün miktarı ve kalitesi belirsizlikleri altında, çok ürünlü, çok aşamalı, kapasite ve tesis sayısı kısıtlı iki aşamalı SP modelidir. Çalışmanın amacı tersine lojistik ağ tasarımı ile ilgili literatürün irdelenip açıkların tespit edilmesi ve özellikle problemin tabiatında bulunan belirsizliklerin dikkate alınarak bu yönde karar vericilere karar verme sürecini kolaylaştıran bir model önerilmesidir.

Bu tez çalışmasında yazına birkaç yönden katkıda bulunulmuştur. İlk olarak incelenen yazın çalışmalarına göre tersine lojistik ağ tasarımında geri dönüşüm opsiyonu için kalite ve miktar belirsizliklerini aynı ele alan ilk çalışmadır.

İkinci olarak belirsiz parametreler altında tersine lojistik ağ tasarımı yaparken önerilen SP modelinin çözümünde iki farklı yaklaşım uygulanmıştır. Birinci yaklaşım belirsizliklerin az sayıda senaryo ile ifade edildiği ve SP modelinin monolitik eşdeğer tam sayılı doğrusal programlama modeline dönüştürülerek çözüldüğü yaklaşımdır. İkinci yaklaşıma da ise çok sayıda senaryo ile ilk yaklaşımda çözüm elde edilemeyen problemler için örneklem yaklaşımı ile önerilen SP modelinin yaklaşık çözümünün bulunduğu SAA tekniği ile yapılan çözümdür. Çalışmada, SP modelinin çözümünde ele alınan iki farklı yaklaşım önerilmesi ve bu yaklaşımların karşılaştırılması açısından da yazında katkıda bulunulmuştur.

Üçüncü olarak çalışmada incelenen yazın çalışmaları açısından bakıldığında ilk defa AEEE sektöründe hizmet vermekte olan üçüncü parti tersine lojistik firmaları için genel bir ağ tasarımı yapılmıştır.

Dördüncü olarak önerilen modelde geri dönüşüm TL ağı için bazı yeni kısıt ve değişkenler kullanılmıştır.

Ülkemiz açısından bakıldığında ise TLAT konusunda ülkemizdeki çalışma sayısı çok kısıtlıdır. Bu açıdan çalışmamız hem gerçek hayat verilerinin kullanılması, hem de belirsizlikleri dikkate alması ile ülkemizde TLAT yazınındaki büyük bir boşluğu doldurmaktadır. Ayrıca çalışmada önerilen üçüncü parti tersine lojistik firmaları için önerilen genel ağ modeli ile hem bu alanda faaliyet gösteren hem de bu alana girmek isteyen firmalara alacakları stratejik kararlarda destek sağlamaktadır. Gerçek hayat koşullarında birçok parametrenin belirsiz olduğu düşünüldüğünde, çalışmada belirsizlikler altında ağ tasarımı yapıldığından karar almada yöneticilerin işi kolaylaştırılmaktadır.

Çalışmada geliştirilen monolitik SP ve SAA tabanlı SP modellerinin ilk olarak sayısal örnek üzerinde uygulaması yapılmıştır. Deneysel çalışma aşamasında ise farklı büyüklüklerdeki problem türleri için çözümler yapılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Sonuçlar SAA yaklaşımının monolitik yaklaşıma göre daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. SAA içinde de örneklem sayısı ve büyüklüğü artışı ile çözüm kalitesinde artış sağlandığı gösterilmiştir.

Ayrıca çalışmada geliştirilen model İzmit'te AEEE geri dönüşümü alanında hizmet vermekte olan üçüncü parti lojistik firmasının ağ tasarım problemine uygulanmıştır. Sonuçlar geliştirilen stokastik modelin ekonomik açıdan etkin olduğunu göstermektedir. Önerilen modeller geri dönen ürün miktarı ve ayıklama oranı ile ifade edilen kalite belirsizliklerini gidererek yöneticilere stratejik yatırım kararı almada yardımcı olmaktadır.

AEEE geri dönüşüm firması için uygulanan model GAMS 23.5.1/CPLEX 12.2 optimizasyon programı ile çözülmüştür. İlk aşamada tüm model parametrelerinin belirli olduğu varsayımı altında geliştirilen deterministik model çözülmüştür. Buna göre deterministik modelin optimal amaç fonksiyonu değeri 3.065.824,78 TL olarak hesaplanmıştır. Deterministik model sonuçlarına göre İzmit, Tekirdağ ve Kayseri ayıklama merkezlerinin açılmasına karar verilmiştir. Geri dönüşüm merkezi olarak da İzmit tesisinin açılmasına karar verilmiştir. İkinci aşamada miktar ve kalite belirsizliklerinin on sekiz senaryo ile ifade edildiği SP modeli çözümünde ise amaç fonksiyonu değerinden 3.079.588,666 TL olarak elde edilmiştir. Monolitik stokastik model sonuçlarına göre de İzmit, Tekirdağ ve Kayseri ayıklama merkezleri ile İzmit

geri dönüşüm merkezinin açılmasına karar vermiştir. Eldeki mevcut veriler de sonuçlarının doğruluğunu destekler mahiyettedir.

Karar vericilerin belirsizlik altında karar vermek için katlanmayı göze aldıkları bir maliyet söz konusudur. Önerilen SP modelinin geçerliliğini test etmek için Madansky (1960) tarafından geliştirilen eşitsizliklere uyup uymama durumuna bakılmıştır. Bunun neticesinde geliştirilen monolitik SP modelin belirsizliklerle başa çıkmada ekonomik ve kullanılabilir bir model olduğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca geliştirilen model için senaryo sayısı, geri dönen miktar ve kapasite kısıtlarındaki değişimler için duyarlılık analizleri yapılarak modelin esneklik seviyesi ortaya konulmuştur.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise çok sayıdaki senaryo için yaklaşım çözüm veren SAA tekniği kullanılmıştır. Bunun için 20, 40 ve 60 senaryo sayılarından örneklem için yirmi tekrarlı çözümler yapılmıştır. Bu çözümler neticesinde en küçük toplam maliyet 1.354.451,39 TL olarak 60 senaryo sayılı yirmi tekrarlı hesaplamalarda elde edilmiştir. Yine çözümün kalitesini gösteren bir diğer parametre olan optimalite boşluğu açısından da 60 senaryo ve yirmi tekrarlı çözüm en iyi sonucu vermiştir. İzmit, Tekirdağ ve Kayseri lokasyonları AT olarak seçilirken, GDM olarak İzmit lokasyonu seçilmiştir. SAA yaklaşımı örneklem yaklaşımı olduğu için elde edilen sonuçların %95 ve %90 anlamlılık derecelerine göre kabul edilme durumlarına bakılmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar her iki güven düzeyinde de anlamlı bulunmuştur. Açıkça görülmektedir ki geliştirilen SAA yaklaşımı belirsizlikle başa çıkmada uygun ve kabul edilebilir sonuçlar vermektedir. Aynı zamanda ilk aşamada ele alınan monolitik yaklaşıma göre çözüm performansı daha iyidir. Dolayısıyla karar vericilere GDAT sürecinde önemli bir karar destek aracı olarak öne çıkmaktadır.

Çalışmada SP modeli çözümü için geliştirilen SAA yönteminin çözüm kalitesini ölçmek iki kritik parametre olan örneklem sayısı ve örneklemi oluşturan senaryo sayısı değerlerinin amaç fonksiyonu üzerindeki etkisini analiz etmek için bir takım testler yapılmıştır. Analiz sonuçları genel olarak örneklem büyüklüğü ve senaryo sayısındaki artışın amaç çözüm kalitesini arttığını ortaya koymuştur.

Son aşama da önerilen iki farklı yaklaşım olan monolitik SP ve SAA yaklaşımının sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre SAA yaklaşımının

belirsizlikler altındaki TLAT probleminin çözümünde oldukça iyi bir performans gösterdiği ortaya konulmuştur.

7.1 Gelecekteki Çalışmalar İçin Tavsiyeler

Gelecekteki çalışmalarda daha fazla miktar ve kaliteye ek olarak zaman başta olmak üzere, taşıma maliyeti, işleme maliyeti, toplama fiyatı, tesis kapasiteleri ve yerleri vb. parametrelerin belirsiz olması durumu modele dâhil edilebilir. Bu durumda ise model karmaşık hale geleceğinden çözüm sürecinde sezgisel metotlar kullanılarak optimal çözüm metotları ile çözüm performansları karşılaştırılabilir. Belirsizlikleri ele almada stokastik programlamaya ek olarak bulanık programlama, robust programlama ile bulanık-stokastik programlama ve robust-stokastik programlama modelleri geliştirilerek çözümler karşılaştırılmak suretiyle en uygun modelleme yaklaşımı önerilebilir. Yine aynı şekilde çevresel etki, geri dönüşüm performansı, müşteri memnuniyeti, aynı anda hem kar maksimizasyonu ve maliyet minimizasyonu vb. amaçlar beraber düşünülerek çok amaçlı bir model düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- Achillas, C., Vlachokostas, C., Aidonis, D., Moussiopoulos, N., Iakovou, E., Banias, G. (2010). Optimising reverse logistics network to support policy-making in the case of electrical and electronic equipment. *Waste Management*, 30, 2592–2600.
- Achillas, Ch., Aidonis, D., Vlachokostas, Ch., Moussiopoulos, N., Banias, G., Triantafillou, D. (2012). A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 76–84.
- Ahluwalia, P.K., Nema, A.K. (2006). Multi-objective reverse logistics model for integrated computer waste management. *Waste Management & Research*, 24, 514-527.
- Ahmed, S., Shapiro, A. (2002). The sample average approximation method for stochastic programs with integer recourse. *SIAM Journal of Optimization*, 12, 479—502.
- Akdemir, H.G. (2012). *İki seviyeli stokastik taşıma problemlerine çözüm önerileri* (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Matematik Anabilim Dalı.
- Allsopp, M., Santillo, D., Johnston, P. (2006). *Environmental and human health concerns in the processing of electrical and electronic waste* (Technical Note). Greenpeace Research Laboratories, Department of Biological Sciences, University of Exeter, UK.
- Al-Qahtani, K., Elkamel, A. (2010). Robust planning of multisite refinery networks: Optimization under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, 34, 985–995.
- Alumur, S. A., Nickel, S., Da Gama, F. S., Verter V. (2012). Multi-period reverse logistics network design. *European Journal of Operational Research*, 220, 67–78.
- Amin, S.H., Zhang, G. (2012). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 37, Issue 6, 4165–4176.
- Aras, N., Aksen, D., Tanuğur, A.G. (2008). Locating collection centers for incentive- dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles. *European Journal of Operational Research*, 191, 1223-40.
- Assavapokee, T., Wongthatsanekorn, W. (2012). Reverse production system infrastructure design for electronic products in the state of Texas. *Computers & Industrial Engineering*, 62, 129–140.

- Aydin, N., Murat, A.** (2013). A swarm intelligence based sample average approximation algorithm for the capacitated reliable facility location problem. *International Journal of Production Economics*, 145, Issue 1, 173-183.
- Babazadeh, R., Moghaddam, R. T., Razmi, J.** (2012). A complex design of the integrated forward-reverse logistics network under uncertainty. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 23, No: 2, 113-123.
- Barros, L., Dekker, R., Scholten, V.** (1998). A two-level network for recycling sand: a case study. *European Journal of Operational Research*, 110, 199-214.
- Bayraksan, G., Morton, D. P.** (2011). A sequential sampling procedure for stochastic programming. *Operations Research*, 59, No. 4, 898–913.
- Beamon, B.M., Fernandes, C.** (2004). Supply-chain network configuration for product recovery. *Production Planning and Control*, 15(3), 270-281.
- Bereketli, I., Genevois, M.E., Albayrak, Y. E., Ozyol, M.** (2011). WEEE treatment strategies' evaluation using fuzzy LINMAP method. *Expert Systems with Applications*, 38, 71–79.
- Birge, J.R.** (1997). Stochastic programming computation and application. *Inform Journal on Computing*, 9, No:2, 111-133.
- Birge, J.R., Louveaux, F.V.** (1997). *Introduction to stochastic programming*. New York: Springer-Verlag.
- Branda, M.** (2012). Sample approximation technique for mixed-integer stochastic programming problems with several chance constraints. *Operations Research Letters*, 40, 207–211.
- Brito, M.P., Flapper, S.D.P., Dekker, R.** (2002). *Reverse logistics: a review of case studies* (Econometric Institute report). EI 2002-21.
- Büyükoğlan G., Vardaloğlu Z.** (2008). Yeşil tedarik zinciri yönetimi. *Lojistik Dergisi*, 8, 66-73.
- Chancerel, P., Rotter, S.** (2009). Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment. *Waste Management*, 29, 2336–2352.
- Chanintrakul P., Mondragon A.E.C., Lalwani C., Wong C.Y.** (2009). Reverse logistics network design: a state-of-the-art literature review. *Int. J. Business Performance and Supply Chain Modelling*, 1, No. 1, 61-81.
- Cheng, L.** (2009). Design for the reverse logistics network based on the reverse logistics center location. *International Forum on Information Technology and Application*. 457-459, China: May 15-17
- Chouinard, M., D'Amours, S., Ait-Kadia, D.** (2008). A stochastic programming approach for designing supply loops. *International Journal of Production Economics*, 113, 657–677.

- Cimino, A., Longo, F., Mirabelli, G.** (2010). Logistic network design with products returns: a state of the art overview. *Proceedings of The International Workshop on Applied Modeling & Simulation*, Buzios, Rio de Janeiro: May 5-7, 310-316.
- Cui, J., Forssberg, E.** (2003). Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, B99, 243–263.
- Dantzig, G. B. ve Infanger, G.** (2011). A probabilistic lower bound for two-stage stochastic programs. *International Series in Operations Research & Management Science*, 150, 13-35.
- Das, K., Chowdhury, A.** (2012). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. *Int. J. Production Economics*, 135, 209–221.
- Dat, L.Q., Linh, D.T.T., Chou, S.Y., Yu, V.F.** (2012). Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. *Expert Systems with Applications*, 39, 6380–6387.
- De Brito, M. P.** (2004). *Managing reverse logistics or reversing logistics management?* (Doktora Tezi). Erasmus University Rotterdam.
- De Oliveira, C.R., Bernardes, A.M., Gerbase, A. E.** (2012). Collection and recycling of electronic scrap: a worldwide overview and comparison with the Brazilian situation. *Waste Management*, 32, Issue 8, 1592–1610
- Dekker, R., Inderfurth, K., van Wassenhove, L.N., Fleischmann, M.** (2004). *Reverse logistics: quantitative models for closed-loop supply chains*. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag.
- Demirel, N., Gökçen, H., Akçayol, M. A., Demirel E.** (2011). Çok aşamalı bütünselik lojistik ağı optimizasyonu probleminin melez genetik algoritma ile çözümü. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(4), 929-936.
- Demirel, Ö. N., Gökçen, H.** (2008a). Geri kazanımlı imalat sistemleri için lojistik ağı tasarımı: literatür araştırması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(4), 903-912.
- Denizel, M., Ferguson, M., Souza, G.C.** (2010). Multiperiod remanufacturing planning with uncertain quality of inputs. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 57(3), 394-404.
- Di Domenica, N., Mitra, G., Valente, P., Birbilis G.** (2007). Stochastic programming and scenario generation within a simulation framework: An information systems perspective. *Decision Support Systems*, 42, 2197–2218.
- Du, F. ve Evans, G.** (2008). A bi-objective reverse logistics network analysis for postsale service. *Computers and Operations Research*, 35, 2617-2634.
- Dupacova, J.** (2002). Applications of stochastic programming: achievements and questions. *European Journal of Operational Research*, 140, 281–290.

- EC**, (2003a). Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). joint declaration of the European Parliament, the council and the commission relating to article 9, Official Journal L 037, 13/02/2003, 24-39.
- EC**, (2003b). Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS), Official Journal L 037, 13/02/2003, 19-23.
- Efendigil, T., Önüt, S., Kongar, E.** (2008). A holistic approach for selecting a third-party reverse logistics provider in the presence of vagueness. *Computers & Industrial Engineering*, 54, 269–287.
- El-Sayed, M., Afia, N. ve El-Kharbotly, A.** (2010). A stochastic model for forward-reverse logistics network design under risk. *Computers & Industrial Engineering*, 58, 423-431.
- Eskandarpour, M., Zegordi, S.H., Nikbakhsh, E.** (2013). A parallel variable neighborhood search for the multi-objective sustainable post-sales network design problem. *International Journal of Production Economics*, 145,117-131.
- Fathi, M., Hasanzadeh, A., Raad, A., Dehghanian, F., Mansour, S.** (2009). Using compromised method in design of reverse logistics network with eco-efficiency consideration. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. China: Dec 8-11, 1454-1458.
- Fleischmann, M.** (2000). *Quantitative models for reverse logistics* (Doktora Tezi). Erasmus University Rotterdam.
- Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Van Wassenhove, L.N.** (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management*, 10(2), 156-173.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., Van Der Laan, E., Van Nunen, J.A.E.E., Van Wassenhove, L.N.** (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 characterization of logistics networks for product recovery. *Omega*, 28, 653-666.
- 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 in supply chains with product recovery. *Omega*, 37, 757 – 769.

- Frauendorfer K., Kuhn, D., Schürle, M.** (2011). Barycentric bounds in stochastic programming: theory and application. In Infanger, G. (Eds.), *Stochastic Programming, International Series in Operations Research & Management Science* (150, pp. 67-96). New York: Springer.
- Ge, X.Q., Tian, Z.Y., Zhang, J.** (2009). Designing three-stage reverse logistics network with incentive. *International Conference on Electronic Commerce and Business Intelligence*. China: June 6-7, 213-216.
- Gomes, M. I., Pova, A. P. B., Novais, A. Q.** (2011). Modelling a recovery network for WEEE: A case study in Portugal. *Waste Management*, 31, 1645–1660.
- Greenwald, A., Guillemette, B., Naroditskiy, V., Tschantz, M.** (2006). Scaling up the sample average approximation method for stochastic optimization with applications to trading agents, In H.L. Poutre, N.M. Sadeh, S. Janson (Eds.), *Agent-Mediated Electronic Commerce. Designing Trading Agents And Mechanisms Lecture Notes in Computer Science*. (3937, pp. 187-199). New York: Springer Berlin Heidelberg.
- Grunow, M., Gobbi, C.** (2009). Designing the reverse network for WEEE in Denmark. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58, 391–394.
- Gülsün, B., Tuzkaya, G., Bildik, E.** (2008). Reverse logistics network design: A simulated annealing approach. *Sigma*, 26, Sayı 1, 68-80.
- Gupta, V., Grossmann, I. E.** (2011). Solution strategies for multistage stochastic programming with endogenous uncertainties. *Computers and Chemical Engineering*, 35, 2235– 2247.
- Gutierrez, Y. B., Diaz, B. A., Hopp M.** (2008). An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 481–495.
- He, W., Li, G., Ma, X. Wang, H., Huang, J., Xu, M., ... Huang C.** (2006). WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*, B136, 502–512.
- Higle, J.L.** (2005). Stochastic programming: Optimization when uncertainty matters. In Greenberg, H. J., Smith, J. C. (Eds.), *Tutorials in operations research: emerging theory, methods, and applications* (pp.30-53). Hanover, USA: Informs.
- Hiller, F.S., Lieberman G.J.** (2001). *Solution Manuel to accompany Introduction to Operation research* (7th ed.). Boston: McGraw Hill.
- Hischier, R., Wager, P., Gaughhofer J.** (2005). Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Environmental Impact Assessment Review*, 25, 525– 539.
- Hong, I.H., Assavapokee, T., Ammons, J., Boelkins, C., Gilliam, K., Oudit, D., ... Wongthatsanekorn W.** (2006). Planning the e-scrap reverse production system under uncertainty in the state of Georgia: A case study. *IEEE Transactions On Electronics Packaging Manufacturing*, 29(3), 150-162.

- Hosseinzadeh, M., Roghanian, E.** (2012). An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment using genetic algorithm. *International Journal of Business and Social Science*, 3, No. 12, 249-264.
- Hu, T.L., Sheu, J.B., Huand, K.H.** (2002). A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes. *Transportation Research, Part E*, 38, 457-473.
- Ilgin, M.A., Gupta, S. M.** (2010). Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *Journal of Environmental Management*, 91, 563–591.
- Infanger, G.** (1992). *Planning Under Uncertainty-solving Large Scale Stochastic Linear Programs* (Teknik Rapor). Stanford University Department of Operations Research, SOL-92-8. California.
- Jayaraman, V., Guide Jr, V.D.R., Srivastava, R.** (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, 50, 497-508.
- Jayaraman, V., Patterson, R.A., Rolland, E.** (2003). The design of reverse distribution networks: models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*, 150, 128-49.
- Kaçtıoğlu, S., Şengül, Ü.** (2010). Erzurum kenti ambalaj atıklarının geri dönüşümü İçin tersine lojistik ağı tasarımı ve bir karma Tamsayılı programlama modeli. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 24(1), 89-112.
- Kall, P., Wallace, S.W.** (1994). *Stochastic programming*. U.K.: John Wiley and Sons.
- Kannan, D., Diabat, A., Alrefaei, M., Govindan, K., Yong, G.** (2012). A carbon footprint based reverse logistics network design model. *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 75– 79.
- Kara, S. S., Onut, S.** (2010a). 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.
- Kara, S. S., Onut, S.** (2010b). A stochastic optimization approach for paper recycling reverse logistics network design under uncertainty. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 7 (4), 717-730.
- Kara, S., Rugrungruang, F., Kaebernick, H.** (2007). Simulation modeling of reverse logistics networks, *Int. J. Production Economics*, 106, 61–69.
- Karaçay, G.** (2005). Tersine Lojistik: Kavram ve İşleyiş, *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 14, Sayı 1, 317-331.
- Karuppiah, R., Martin, M., Grossmann, I. E.** (2010). A simple heuristic for reducing the number of scenarios in two-stage stochastic programming. *Computers and Chemical Engineering*, 34, 1246–1255.
- Khajavi, L. T., Mohammad, S., Hosseini, S., Makui, A.** (2011). An integrated forward/reverse logistics network optimization model for multi-stage capacitated supply chain. *iBusiness*, 3, 229-235.

- Khor, C. S.** (2006). *Hybrid of stochastic programming approaches with economic and operational risk management for petroleum refinery planning under uncertainty* (Yüksek Lisans Tezi). The University of Waterloo.
- Kiya, F., Davoudpour H.** (2012). Stochastic programming approach to re-designing a warehouse network under uncertainty. *Transportation Research Part E*, 48, 919–936.
- Kleywegt, A. J., Shapiro A., De Mello, T. H.** (2001). The sample average approximation method for stochastic discrete optimization. *SIAM Journal of Optimization*, 12, No. 2, 479–502.
- Kolbin, V.V.** (1977). *Stochastic programming*, Dordrecht: D. Reidel Publishing.
- Körpeoğlu, E., Yaman, H., Aktürk M. S.** (2011). A multi-stage stochastic programming approach in master production scheduling. *European Journal of Operational Research*, 213, 166–179.
- Krikke, H.R., Bloemhof-Ruwaard, J., Van Wassenhove, L.N.** (2001). *Design of closed loop supply chains: a production and return network for refrigerators* (Erasmus Research Institute of Management Report Series). Netherlands.
- Krikke, H.R., Van Harten, A., Schuur P.C.** (1999). Reverse logistic network re-design for copiers. *OR Spektrum*, 21, 381-409.
- Kumar, S., Malegeant, P.** (2006). Strategic alliance in a closed-loop supply chain, a case of manufacturer and eco-non-profit organization. *Technovation*, 26, 1127–1135.
- Kusumastuti, R.D., Piplani, R., Lim, G.H.** (2004). An approach to design reverse logistics networks for product recovery. *Engineering Management Conference*. IEEE International: Oct 18-21. 3, 1239- 1243.
- Lambert, A.J.D., Boelaarts H.M., Splinter M.A.M.** (2004). Optimal recycling system design: with an application to sophisticated packaging tools. *Environmental and Resource Economics*, 28, 273-299.
- Larijani, A.M., Jabalameli, M.S., Moghaddam, R.T.** (2012). A network design model considering inventory cost from a third party logistics perspective. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 7(1), 29-35.
- Lawrence, K. D., Klimberg, R. K., Lawrence, S. M.** (2009). *Fundamentals of Forecasting Using Excel*, New York: Industrial Press Inc.
- Lee, D., Dong, M., Bian, W.** (2010). The design of sustainable logistics network under uncertainty. *Int. J. Production Economics*, 128, 159–166.
- Lee, D.H., Dong, M.** (2008). A heuristic approach to logistics network design for end-of- lease computer products recovery. *Transportation Research, Part E*. 44, 455-474.
- Lee, D.H., Dong, M.** (2009). Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty. *Transportation Research, Part E*. 45, 61-71.

- Lee, F.E., Lee, K.D.** (2012). Integrated forward and reverse logistics model: A case study in distilling and sale company in Korea. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 8, no:7(A), 4483-4495.
- Lee, J.E., Gen, M., Rhee, K.G.** (2009). Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 56, 951-966.
- Lee, Y.J.** (2009). *Integrated forward-reverse logistics system design: An empirical investigation* (Doktora Tezi). Washington State University.
- Li, R.C., Tee, T.J.C.** (2012). A reverse logistics model for recovery options of e-waste considering the integration of the formal and informal waste sectors. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 40, 788 – 816.
- Lieckens, K. ve Vandaele, N.** (2007). Reverse logistics network design with stochastic lead times. *Computers & Operations Research*, 34, 395-416.
- Linton, J.D., Johnston, D.A.** (2000). A decision support system for planning remanufacturing at Nortel Networks. *Interfaces*, 30(6), 17 – 31.
- 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.
- Listeş, O., Dekker, R.** (2005). A stochastic approach to a case study for product recovery network design. *European Journal of Operational Research*, 160, 268-87.
- Long, Y., Lee L.H., Chew, E.P.** (2012). The sample average approximation method for empty container repositioning with uncertainties. *European Journal of Operational Research*, 222(1), 65–75.
- Louwers, D., Kip, B.J., Peters, E., Souren, F., Flapper, S.D.P.** (1999). A facility location allocation model for reusing carpet materials. *Computers and Industrial Engineering*, 36, 855-869.
- Lu, Y., Lu, P., Liang, L.** (2008). Multi-objective optimization of reverse logistics network based on random weights and genetic algorithm. *International Conference on Networking, Sensing and Control*. China: April 6-8, 1196-1200.
- Lu, Z., Bostel, N.** (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: the case of remanufacturing activities. *Computers and Operations Research*, 34, 299-323.
- Mak, W.K., Morton, D. P., Wood, R. K.** (1999). Monte Carlo bounding techniques for determining solution quality in stochastic programs. *Operations Research Letters*, 24, 47-56.
- Marti, K.** (2005). *Stochastic Optimization Methods* (Second Ed.). Berlin: Springer.

- Mier, M.O., Hipolito, J.D., Sanchez, A.G.** (2009). Scatter search for locating a treatment plant and the necessary transfer centers in a reverse network. *Metaheuristics in the service industry, lecture notes in economics and mathematical systems*, 624, 63-81.
- Min, H., Ko, H. J.** (2008). The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers. *International Journal of Production Economics*, 113, 176-192.
- Min, H., Ko, H. J., Ko, C. S.** (2006). A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns. *Omega*, 34, 56-69.
- Montgomery, D.C., Runger, G. C., Hubele, N.F.** (2011). *Engineering Statistics* (5th Ed.). United States of America: John Wiley & Sons Inc.
- Mounir, B., Afifa, K., Habib, C.** (2011). Facility location model for reverse logistics. *Advances in Production Engineering & Management*, 6 (1), 37-44.
- Mukta, P., Kumar, U.A.** (2009). Neural networks and statistical techniques: a review of applications. *Expert Systems with Applications*, 36 (1), 2-17.
- Mutha, A., Pokharel, S.** (2009). Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules. *Computers & Industrial Engineering*, 56, 334-346.
- Nesterov, Y., Vial, J. P.** (2008). Confidence level solutions for stochastic programming. *Automatica*, 44, 1559–1568.
- Norkin, V.I., Ermoliev, Y. M., Ruszczyński A.** (1998). On optimal allocation of indivisibles under uncertainty. *Operations Research*, 16, No. 3, 381-395.
- Ongondo, F.O., Williams, I.D., Cherrett, T.J.** (2011). How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste Management*, 31, 714–730.
- Paksoy, T., Bektaş, T., Özceylan E.** (2011). Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain. *Transportation Research Part E*, 47, 532–546.
- Pati, R. K., Vrat, P., Kumar, P.** (2008). A goal programming model for paper recycling system. *Omega*, 36, 405-417.
- Patil, G., Ukkusuri, S.** (2011). Sample average approximation technique for flexible network design problem. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 25(3), 254–262.
- Pishvaei, M.S., Farajani, R.Z., Dullaert, W.** (2010a). A memetic algorithm for biobjective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & Operations Research*, 37, 1100-1112.
- Pishvaei, 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.

- Pishvaei, M.S., Kianfar, K., Karimi, B.** (2010b). Reverse logistics network design using simulated annealing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47, 269-281.
- Pishvaei, 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.
- Pohlen, T. L., Farris, M. T.** (1992). Reverse logistics in plastics recycling. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 22(7), 35 – 47.
- Qi, Z., Hongcheng, W.** (2008). Research on construction mode of recycling network of reverse logistics of automobile enterprises. *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*. China: Dec 19-21, 36-40.
- Qiang, Q., Ke, K., Anderson, T., Dong, J.** (2013). The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties. *Omega*, 41, 186-194.
- Qin, Z., Ji, X.** (2010). Logistics network design for product recovery in fuzzy environment. *European Journal of Operational Research*, 202, 479-490.
- Qiushuang, C., Qiaolun, G.** (2007). Analysis of quantity uncertainty of returns on remanufacturing logistic network using a stochastic programming model, *IEEE International Conference on Control and Automation*. Guangzhou, China: May 30 -June 1, 3073 – 3077.
- Ramezani, M., Bashiri, M., Moghaddam, R. T.** (2013). A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 328-344.
- Ravi, V., Shankar, R., Tiwari, M.K.** (2005). Analyzing alternatives in reverse logistics for end-of-life computers: ANP and balanced scorecard approach. *Computers & Industrial Engineering*, 48, 327-356.
- Realff, M. J., Ammons, J. C., Newton, D.** (2000). Strategic design of reverse production systems. *Computers and Chemical Engineering*, 24, 991-996.
- Realff, M.J., Ammons, J. C., Newton, D. J.** (2004). Robust reverse production system design for carpet recycling. *IIE Transactions*, 36(8), 767-776.
- REC**, (2011). The Regulatory Impact Analysis (RIA) (Yayınlanmamış Teknik Rapor). Ankara.
- Ren, C., Ye J.** (2011). Improved particle swarm optimization algorithm for reverse logistics network design. *Energy Procedia*, 13, 4591 – 4600.
- Rivera, R.C., Ertel, J.** (2009). Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico. *European Journal of Operational Research*, 196, 930-939.
- Rogers, D., Tibben-Lembke, R.** (1999). *Going backwards: reverse logistics trends and practices*. Pittsburgh: RLEC Press.

- Ruszczyński, A., Świetanowski, A.** (1997). Accelerating the regularized decomposition method for two stage stochastic linear problems. *European Journal of Operational Research*, 101, 328-342.
- Sahinidis, N. V.** (2004). Optimization under uncertainty: State-of-the-art and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, 28, 971-983.
- Sahyouni, K., Savaskan, R.C., Daskin, M.S.** (2007). A facility location model for bidirectional flows. *Transportation Science*, 41(4), 484-499.
- Salema, M.I., Povea, A.P.B., Novais, A.Q.** (2006). A warehouse-based design model for reverse logistics. *Journal of the Operational Research Society*, 57, 615-629.
- Salema, M.I.G., Barbosa-Povea, 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.
- Salema, M.I.G., Barbosa-Povea, A.P., Novais, A.Q.** (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203, 336-349.
- Santoso, T.** (2003). *A comprehensive model and efficient solution algorithm for the design of global supply chains under uncertainty* (Doktora Tezi). School of Industrial & Systems Engineering Georgia Institute of Technology.
- Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., Shapiro A.** (2005). A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167, 96-115.
- Sasikumar, P., Kannan, G., Haq, A.N.** (2010). A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery-a case of truck tire remanufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9-12), 1223-1234.
- Schütz, P., Tomaszgord, A., Ahmed S.** (2009). Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition. *European Journal of Operational Research*, 199, 409-419.
- Sen, S., Hige, J.L.** (1999). An introductory tutorial on stochastic linear programming models. *Interfaces*, 29, 33-61.
- Şengül, Ü.** (2009). Tersine lojistik kavramı ve tersine lojistik ağ tasarımı. 10. *Ekonometri ve İstatistik Sempozyumu*. Palandöken, Erzurum: Mayıs 27-29.
- Shapiro, A.** (2012). Minimax and risk averse multistage stochastic programming. *European Journal of Operational Research*, 219, 719-726.
- Shapiro, A., De Mello, T. H.** (1998). A simulation-based approach to two-stage stochastic programming. *Mathematical Programming*, 81, 301-325.

- Shapiro, A., De Mello, T.H.** (2001). On rate of convergence of Monte Carlo approximations of stochastic programs. *SIAM Journal on Optimization*, 11, 70-86.
- Shapiro, A., Philpott, A.** (1997). *A tutorial on stochastic programming*, Erişim adresi: http://www2.isye.gatech.edu/people/faculty/Alex_Shapiro/TutorialSP.pdf, Erişim tarihi:14.02.2013.
- Shapiro, J.F.** (2004). Challenges of strategic supply chain planning and modeling. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 855-861.
- Shi, L., Fan, H., Gao, P., Zhang, H.** (2009). Network Model and Optimization of Medical Waste Reverse Logistics by Improved Genetic Algorithm. In Z. Cai, Z. Li, Z. Kang, Y. Liu (Eds.), *Advances in Computation and Intelligence Lecture Notes in Computer Science* (5821, pp.40-52). New York: Springer Berlin Heidelberg.
- Shih, L.H.** (2001). Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling*, 32, 55-72.
- Snyder, L.V., Daskin, M.S.** (2006). Stochastic p -robust location problems. *IIE Transactions*, 38, 971-985.
- Sodhi, M.S., Tang, C.S.** (2009). Modeling supply-chain planning under demand uncertainty using stochastic programming: A survey motivated by asset-liability management. *Int. J. Production Economics*, 121, 728-738.
- Spengler, T., Püchert, H., Penkuhn, T., Rentz, O.** (1997). Environmental integrated production and recycling management. *European Journal of Operational Research*, 97, 308-326.
- Srivastava, S.K.** (2008a). Network design for reverse logistics. *Omega*, 36, 535-548.
- Srivastava, S.K.** (2008b). Value recovery network design for product returns. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(4), 311-331.
- Srivastava, S.K., Srivastava, R.K.** (2006). Managing product returns for reverse logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 36 (7), 524-546.
- Stock, J.R.** (1992). Reverse Logistics. *Council of Logistics Management*, Oak Brook, IL.
- Subramanian, P., Ramkumar, N., Narendran, T.T., Ganesh K.** (2013). PRISM: priority based simulated annealing for a closed loop supply chain network design problem. *Applied Soft Computing*, 13, 1121-1135.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı,** (2011). *Özel Atık İstatistikleri*. Erişim adresi: [http://atikyonetimi.cevreorman.gov.tr/atikyonetimi/files/%c3%96zel%20at%c4%b1k%20%c4%b0statistikleri%20\(2003-2009\).pdf](http://atikyonetimi.cevreorman.gov.tr/atikyonetimi/files/%c3%96zel%20at%c4%b1k%20%c4%b0statistikleri%20(2003-2009).pdf)

- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı,** (2008). *Elektrikli ve elektronik eşyalarda bazı zararlı maddelerin kullanımının sınırlandırılmasına dair yönetmelik*. Erişim adresi: [http:// www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/05/ 20080530-3.htm](http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/05/20080530-3.htm).
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı,** (2012). *Atık elektrik elektronik eşyaların (AEEE) kontrolü yönetmeliği*. Erişim adresi: <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/05/20120522-5.htm>
- Taha, H.A.** (2003). *Operation Research: An Introduction* (8th Ed.). New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Taşar, E.** (2010). *Monte Carlo stokastik optimizasyonu ile optimal saklama payı seviyesi* (Yüksek Lisans Tezi). Hacettepe Üniversitesi.
- Thierry, M., Salomon, M., van Nunen, J., Van Wassenhove, L.** (1995). Strategic issues in product recovery management. *California Management Review- ABI/INFORM Global*, 37(2), 114-135.
- Tian, Z.Y., Jin, C.H., Ge, X.Q.** (2009). Designing reverse logistics network for end-of-life vehicles under capacity constraints. *IEEE 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. China: Oct. 21-23, 1488-1491.
- Tibben-Lembke, R. S.** (2002). Life after death: reverse logistics and the product life-cycle. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 32(3), 223-244.
- Verweij, B., Ahmed, S., Kleywegt, A. J., Nemhauser, G., Shapiro A.** (2002). The sample average approximation method applied to stochastic routing problems: A computational study. *Computational Optimization and Applications*, 24, 289–333.
- Wadhwa, S., Madaan, J., Chan, F.T.S.** (2009). Flexible decision modeling of reverse logistics system: A value adding MCDM approach for alternative selection. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25, 460–469.
- Wang, F., Huisman, J., Meskers, C. E.M., Schluep, M., Stevels, A., Hagelüken, C.** (2012). The Best-of-2-Worlds philosophy: Developing local dismantling and global infrastructure network for sustainable e-waste treatment in emerging economies. *Waste Management*, 32(11), 2134-2146.
- Wang, X., Zhao, L.** (2009). Network design of reverse logistics integrated with forward logistics. *Power and Energy Engineering Conference APPEEC 2009*. Asia-Pacific: March 27-31.
- Wei-min, D., Mei-jie, W.** (2009). Optimal design of manufacturing/remanufacturing logistics network based on uncertain programming. *International Conference on Management Science & Engineering (16th)*. Moscow: Sept. 14-16, 867-873.
- Werner, A. S.** (2004). *Bilevel stochastic programming problems: analysis and application to telecommunications*. (Doktora Tezi). Norwegian University of Science and Technology.

- Wets, R. J.B.** (1996). Challenges in stochastic programming. *Mathematical Programming*, 75, 115-135.
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., Böni, H.** (2005). Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, 25, 436– 458.
- Wongthatsanekorn, W.** (2009). A goal programming approach for plastic recycling system in Thailand. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 49, 513-518.
- Xanthopoulos, A., Iakovou, E.** (2009). On the optimal design of the disassembly and recovery processes. *Waste Management*, 29, 1702-1711.
- Xiangru, M., Wei, S.** (2009a). Open-loop network design based on reverse logistics recycling. *International Conference on Services Science, Management and Engineering*. China: July 11-12, 209-212.
- Xiangru, M., Yongjie, Z., Wei, S.** (2009). Network Construction on Reverse Logistics of Discarded and Used Household Appliances. *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*. Wuhan: July 4-5, 108-111.
- Xie, F.** (2009). Reverse logistics network optimization by genetic algorithm. *Fifth International Conference on Natural Computation*. China: Aug. 14-16, 403-407.
- Yongsheng Z., Shouyang W.** (2008). Generic Model of Reverse Logistics Network Design. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(3), 71-78.
- Zanjani M.K, Nourelfath M., Ait-Kadi D.** (2007). *A stochastic programming approach for production planning in a manufacturing environment with random yield* (Working Document). CIRRELT 2007(58), Québec, Canada. Erişim adresi: <https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2007-58.pdf>
- Zarei, M., Mansour, S., Kashan, A.H., Karimi, B.** (2010). Designing a reverse logistics network for end-of-life vehicles recovery. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010,1-16. doi:10.1155/2010/649028.
- Zeballos, L.J., Gomes, M. I., Povia, A. P. B., Novais, A. Q.** (2012). Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains. *Computers and Chemical Engineering*, 47, 237– 247.
- Zhenqiang, B., Congwei, Z., Yuqin, Z., Quanke, P.** (2012). Research on reverse logistics location under uncertainty environment based on grey prediction. *Physics Procedia*, 24, 1996-2003.
- Zhou, G., Cao, Z., Cao, J., Meng, Z.** (2005). Computational Intelligence and Security. In Y. Hao, J. Liu, Y. Wang, Y. Cheung, H. Yin, L. Jiao,..., Y. Jiao (Eds.). *A genetic algorithm approach on reverse logistics optimization for product return distribution network*. 267–272, Berlin: Springer.

EKLER

Ek A:Deterministik Modele Ait GAMS Modeli CD'si

Ek B:Monolitik Stokastik Programlama Modeline Ait GAMS Modeli CD'si

Ek C:Herbir senaryo için çözülen Deterministik Modellerdeki tesisler arası taşınan ürün miktarları CD'si

Ek D:Monolitik SP modeli için üretilen herbir senaryo için Deterministik Model çözüm sonuçlarına göre tesisler arasında taşınan ürün miktarları CD'si

Ek E:SAA metodunda geri dönen ürün miktarı ve kalitesi için Matlab'da senaryo üretim kodları CD'si

EK F:SP modelinin SAA yaklaşımı ile çözümünde kullanılan alt sınır ve üst sınır SAA GAMS Kodları CD'si

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Berk Ayvaz

Doğum Yeri ve Tarihi: 09.05.1981 / Üsküdar

Adres: İTÜ İşletme Fakültesi. 34367. Maçka Beşiktaş İstanbul

E-Posta: bayvaz@ticaret.edu.tr

Lisans: İÜ Makine Mühendisliği

Yüksek Lisans: İTÜ İşletme Mühendisliği

TEZDEN ÜRETİLEN YAYIN VE SUNUMLAR

▪ **Ayvaz, B.** ve Bolat, H.B. (2013). Kalite Ve Miktar Belirsizlikleri Altında Geri Dönüşüm Ağ Tasarımı, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. Sayı:23, s.55-77.

▪ **Ayvaz, B.** ve Bolat, H.B. (2012). Reverse Logistics Network Design Under Uncertainty. *The Seventeenth International Working Seminar on Production Economics*. 20-24 February 2012, Innsbruck, Austria.

