

**ÇOK ÜRÜNLÜ TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIMI:
MATEMATİKSEL MODEL VE TAVLAMA BENZETİMİ TEMELLİ
ÇÖZÜM YAKLAŞIMI**

Kemal ALAYKIRAN

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2011

ANKARA

Kemal ALAYKIRAN tarafından hazırlanan ÇOK ÜRÜNLÜ TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIMI: MATEMATİKSEL MODEL VE TAVLAMA BENZETİMİ TEMELLİ ÇÖZÜM YAKLAŞIMI adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ertan GÜNER

.....

Tez Danışmanı, Endüstri Müh. Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Serpil EROL

.....

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Ertan GÜNER

.....

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK

.....

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa YURDAKUL

.....

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Çiğdem ALABAŞ USLU

.....

Endüstri Mühendisliği, Okan Üniversitesi

Tarih: 07/07/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Kemal ALAYKIRAN

**ÇOK ÜRÜNLÜ TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIMI: MATEMATİKSEL
MODEL VE TAVLAMA BENZETİMİ TEMELLİ ÇÖZÜM YAKLAŞIMI
(Doktora Tezi)**

Kemal ALAYKIRAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz 2011

ÖZET

Tersine lojistik, kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerin müşterilerden geri alınması ve uygun geri kazanım seçenekleri ile faydalı hale getirilmesi olarak tanımlanabilir. Bu tanımıyla tersine lojistik, işletmelere sunduğu maliyet avantajları ve bu konuda hükümetler tarafından getirilen yasal zorunluluklar nedeniyle, uygulamada ve literatürde gittikçe daha fazla ilgi görmektedir. Bu tezde, çok ürünlü bir tersine lojistik sistemi için farklı geri kazanım seçeneklerinin birlikte ele alındığı bir ağ tasarım problemi incelenmiştir. Ortaya konulan ağ tasarım probleminde, yeniden üretim, geri dönüşüm ve zararlı atıkların işlenmesi seçenekleri aynı anda dikkate alınmıştır. Problemin genel amacı, sistemin toplam maliyetlerini en küçükmektir. Bunun yanı sıra, problemin bir diğer amacı da aday toplam tesisleri içinde hangilerinin ve hangi boyutta açılması gerektiği kararının alınmasıdır. Problemde, ürünler için birden fazla parçalama yönteminin yer alması, çok sayıda geri dönüşüme uygun malzeme tipinin bulunabilmesi, her ürünün yeniden üretime uygun birden fazla parçasının belirlenebilmesi özellikleri ile literatürdeki diğer ağ tasarım problemlerinden ayrılan özgün bir çalışmadır. Çalışmada tanımlanan problemin çözümü için bir karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Problemin büyük boyutlu örneklerinin çözümünü gerçekleştirmek amacıyla tavlama benzetimi temelli bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Bu çerçevede, önerilen yöntemlerin etkinliğini analiz etmek amacıyla farklı ağ yapıları ve

problem parametrelerinin farklı büyüklükleri için toplam 1350 örnek problemden oluşan deneysel bir çalışma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar yorumlandığında, önerilen yöntemlerin dikkate alınan ağ tasarım problemlerinde etkin olduğu tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 906.1.141
Anahtar Kelimeler : Tersine Lojistik, Ağ Tasarımı, Tavlama Benzetimi,
Sayfa Adedi : 100
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Ertan GÜNER

**MULTI PRODUCT REVERSE LOGISTICS NETWORK DESIGN
PROBLEM: MATHEMATICAL MODEL AND SIMULATED ANNEALING
BASED APPROACH
(Ph.D. Thesis)**

Kemal ALAYKIRAN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
July 2011**

ABSTRACT

Reverse logistics, which may be defined as picking up end-of-life products from customers and recovering value using appropriate methods, is taking attention both in the literature and in application due to the cost advantages it serves for the companies and also the legislative requirements. In this thesis, a reverse logistics network design problem for multiple products is considered for multiple recovery options. The recovery methods considered are remanufacturing, recycling and elimination of hazardous waste. The main objective of the problem is minimizing total system cost. Furthermore, deciding which potential collection center should be opened at which dimension is another objective of the system. The problem defined in this study distinguishes from other works in the literature because of the fact that it considers recycling, remanufacturing and treatment of hazardous material together, multiple disassembly methods are defined, multiple recyclable material types are defined and multiple parts appropriate for remanufacturing are defined. In order to solve the problem defined in this thesis, two approaches, a mixed integer mathematical model and a simulated annealing based approach are presented. In this context, in order to analyze the efficiency of the proposed solution methods an experimental study which consists of 1350 problems for different network types and for different values of problem parameters is carried out.

The results are evaluated and it is found out that the proposed solution methods are effective for the problem defined in this thesis.

Science Code : 906.1.141
Key Words : Reverse Logistics, Network Design, Simulated Annealing
Number of Pages : 100
Advisor : Prof. Dr. Ertan GÜNER

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince yaptığım bütün çalışmalarında kıymetli yardım ve katkılarıyla beni yönlendirdiği için tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ertan GÜNER'e, araştırmam süresince bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim ve değerli zamanlarını çalışmalarımın olgunlaşmasına ayıran Sayın Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK'a ve Sayın Doç. Dr. Mustafa YURDAKUL'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca beni yetiştiren ve her zaman destekleriyle yanımda olan çok kıymetli aileme, bütün çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan sevgili eşime şükranlarımı ve sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. TERSİNE LOJİSTİK VE İLGİLİ LİTERATÜR	4
2.1 Tersine Lojistik	4
2.2. Literatür Araştırması	10
3. FARKLI ÜRÜN GERİ KAZANIM SEÇENEKLERİ İÇİN BİR TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIM MODELİ	28
3.1. Problemin Tanımlanması	28
3.1.1. Ürünler	29
3.1.2. Toplama tesisleri	31
3.1.3. Geri dönüşüm tesisleri ve zararlı atık işleme tesisleri.....	32
3.1.4. Müşteriler	32
3.1.5. Üretim tesisleri	33
3.2. Matematiksel Model.....	34
3.3. Deneysel Çalışma.....	40
4. TAVLAMA BENZETİMİ (TB) YAKLAŞIMI	59

Sayfa

4.1. TB Metasezgiseli.....	60
4.2. Matematiksel Modelin Çözümünde Kullanılacak TB Temelli Yaklaşım (TBTY).....	61
4.2.1 Kodlama yapısı	61
4.2.2. Hareket mekanizması	62
4.2.3. Başlangıç çözümünün belirlenmesi.....	63
4.2.4. Kabul koşulu	65
4.3. Problem Yapısına En Uygun TB Parametrelerinin Seçimi.....	66
4.4. Tüm Deneysel Problemlerin TB Temelli Çözümü	70
5. SONUÇ	80
KAYNAKLAR	84
EKLER.....	90
EK-1 Deneysel problem parametrelerinin belirlenme yöntemleri	91
EK-2 Örnek gams kodlaması	93
EK-3 Problemlerin gams ile çözülmesi sonucu elde bazı sonuçlar	96
EK-4 Parametre en iyilemesi için yapılan bazı çözümlerin sonuçları	97
EK-5 Bazı problemlerin tb ile çözümüyle elde edilen sonuçlar	98
ÖZGEÇMİŞ	99

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2. 1. Çalışmaların konu ve metotlarına göre sınıflandırılması.....	11
Çizelge 2. 2. Tersine lojistik literatüründe yapılan çalışmaların özeti.....	12
Çizelge 3. 1. Müşteri sayılarına göre belirlenen aday toplama tesisi sayıları.....	40
Çizelge 3. 2. Parçalama yöntemi sayısı bir olduğunda parçalama planları.....	41
Çizelge 3. 3. Parçalama yöntemi sayısı iki olduğunda parçalama planları.....	43
Çizelge 3. 4. Sistemin diğer parametrelerinin belirlenmesi	46
Çizelge 3. 5. Müşteri sayısına göre çözüm süreleri	47
Çizelge 3. 6. Müşteri sayısı ve parçalama yöntemi sayısı beraberince incelendiğinde çözüm süreleri	48
Çizelge 3. 7. Farklı ağ tiplerindeki örnekler için çözüm süreleri.....	50
Çizelge 3. 8. Farklı ürün sayıları için çözüm süreleri	50
Çizelge 3. 9. Farklı müşteri sayıları ve aday tesis sayıları için çözüm süreleri	51
Çizelge 3. 10. G tipi ağ için çözülen örneklerin ortalama çözüm süreleri	52
Çizelge 3. 11. G_Y tipi ağ için çözülen örneklerin ortalama çözüm süreleri	54
Çizelge 3. 12. G_Y_Z tipi ağ için çözülen örneklerin ortalama çözüm süreleri.....	55
Çizelge 4. 1. Başlangıç çözümünün belirlenmesi için yapılan analiz.....	65
Çizelge 4. 2. Parametre seviyeleri.....	67
Çizelge 4. 3. Uygun parametre kümesinin belirlenmesi	68
Çizelge 4. 4. Müşteri sayısı ve ürün sayısına göre parametre kümelerinin analizi....	69
Çizelge 4. 5. I. grup problemler için farklı müşteri sayılarına göre bulunan sonuçlar	72
Çizelge 4. 6. II. grup problemler için farklı müşteri sayılarına göre bulunan sonuçlar	72

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4. 7. I. grup problemler için aday toplama tesisi sayılarına göre tb ile bulunan sonuçlar	73
Çizelge 4. 8. II. grup problemler için aday toplama tesisi sayılarına göre tb ile bulunan sonuçlar	73
Çizelge 4. 9. I. grup problemler için farklı parçalama yöntemi sayılarına göre tb ile bulunan sonuçlar	74
Çizelge 4. 10. II. grup problemler için farklı parçalama yöntemi sayılarına göre tb ile bulunan sonuçlar	75
Çizelge 4. 11. I. grup problemler için farklı ürün sayılarına göre tb ile bulunan sonuçlar	75
Çizelge 4. 12. II. grup problemler için farklı ürün sayılarına göre tb ile bulunan sonuçlar	76
Çizelge 4. 13. I. grup problemler için farklı ağ tasarım tiplerine göre tb ile bulunan sonuçlar	77
Çizelge 4. 14. II. grup problemler için farklı ağ tasarım tiplerine göre tb ile bulunan sonuçlar	77
Çizelge 4. 15. 7200 saniyenin altında en iyi sonucu bulunamayan problemlere TB ile bulunan sonuçlar	78

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2. 1. 1995-2005 yılları arasında yapılan yayın sayıları.....	11
Şekil 3. 1. Bir ürünün farklı parçalama yöntemleri.....	31
Şekil 3. 2. Müşteri sayısı ve parçalama yöntemi sayısı beraberce incelendiğinde çözüm süreleri	49
Şekil 4. 1 Genel bir TB algoritması	61
Şekil 4. 2. Örnek bir kodlama yapısı.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
i	Üretim tesisleri
s	Ürünler
d	Parçalama yöntemleri
t	Müşteriler
l	Aday toplama tesisi konumları
j	Toplama tesisi tipleri
r	Geri dönüşüm tesisleri
h	Zararlı atık işleme tesisleri
m	Geri dönüştürülebilir malzeme tipleri
g	Yeniden üretilebilir parça tipleri
Q_s	S ürünün ağırlığı
Q_g^l	Yeniden üretilebilir g parçasının ağırlığı
B_s	S ürününün beklenen geri toplama başarısı (yüzde)
$R_{t,s}$	t müşterisinde geri verilmek üzere bekleyen s ürünü miktarı
$O_{l,j}$	l noktasında j tipinde bir toplama tesisi açmanın sabit maliyeti
C_j^l	j tipindeki toplama tesislerinin toplam kapasitesi
$P_{l,s,d}$	d parçalama yöntemine göre s ürününü l toplama tesisinde işlemenin maliyeti

Simgeler**Açıklama**

$\delta_{l,s,d}$	d parçalama yöntemine göre s ürününün l toplama tesisinde işlenirken kullanılan kapasite
C_r^u	r geri dönüşüm tesisine toplam nakledilebilecek geri dönüştürülebilir malzeme miktarı
σ_m^u	Birim ağırlıkta m malzemesinin geri dönüşüm tesisine satılmasından sağlanan gelir
σ_g^i	Birim g parçasının yeniden üretilmesi nedeniyle elde edilen gelir
W_h	Birim zararlı atığın h 'da işlenme maliyeti
C_h^w	h zararlı atık işleme tesisinde kullanılabilir toplam kapasite
F	Birim ağırlığın birim mesafeye taşınması maliyeti
D	Birim ağırlık için katı atık maliyeti
$L_{t,l}^{KC}$	Her bir müşteri ile her bir toplama tesisi arasındaki mesafeler
$L_{l,i}^{CP}$	Her bir toplama tesisi ile her bir üretim tesisi arasındaki mesafe
$L_{l,r}^{CU}$	Her bir toplama tesisi ile her bir geri dönüşüm tesisi arasındaki mesafe
$L_{l,h}^{CW}$	Her bir toplama tesisi ile her bir zararlı atık arıtma tesisi arasındaki mesafe
M	Büyük bir sayı
G	Geri dönüşüm ağı
G_Y	Geri dönüşüm ve yeniden üretimin beraberce ele alındığı ağ

Simgeler**Açıklama**

G_Y_Z

Geri dönüşüm, yeniden üretim ve zararlı atıkların işlenmesini beraberce ele alan ağ

TB

Tavlama Benzetimi

E

Çözüm uzayı boyutu

1. GİRİŞ

İnsan nüfusunun giderek artması ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi, ihtiyaçların karşılanması için üretim hacminin giderek büyümesi nedenleriyle doğal kaynaklar hızla tükenmektedir. Artan tüketime paralel olarak atık hacimleri de giderek artmaktadır. Yıllar boyu süregelen ekonomik kaygılar ile ucuz fakat çevreyi düşünmeyen üretim teknikleri sonucunda çevre kirliliği her geçen gün daha ciddi bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Faydalı ömürleri tükenen ürünlerin müşterilerden geri alınması ve tekrar değerlendirilerek faydalı hale getirilmesi süreci olarak özetlenebilecek tersine lojistik bu bağlamda, yaşadığımız yüzyılda rekabet avantajı elde etmek isteyen şirketler için yararlı ve önemli bir stratejik karar olarak karşımıza çıkmaktadır. Tersine lojistiğin çevreci bakış açısı çok önemli olsa da bunun yanı sıra üreticilere sunduğu maliyet avantajları da dikkate değerdir. Üreticiler müşterilerinden geri aldıkları ürünler sayesinde hammadde, enerji ve işgücü maliyetlerinde azalma sağlayabilirler. Diğer bir açıdan da her geçen gün çıkartılan yeni yasalar ile üreticiler tersine lojistik ve çevreci üretim yöntemleri konusunda çalışma yapmaya yönlendirilmektedir. Tersine lojistiğin uzun vadeli faydalarından biri de hiç şüphesiz üretici firma ile müşteriler arasındaki ilişkileri kuvvetlendirmesidir.

Etkin bir tersine lojistik sisteminin en önemli unsurlarından birisi, müşterilerden ürünlerin geri alınması, geri alınan bu ürünlerin en doğru veya en karlı şekilde geri kazanımı ve tüm bu işlemler sırasında meydana gelen taşımaların en az seviyeye düşürülmesi için etkin bir ağ tasarımıdır. Bu tez çalışmasında, çok ürünlü bir tersine lojistik ağ tasarımı problemi incelenmiştir. Çalışmada dikkate alınan problemi, literatürdeki benzerlerinden ayıran birçok özelliği vardır. Yeniden üretim, geri dönüşüm ve geri kazanım sürecinde ortaya çıkan zararlı atıkların işlenmesi seçenekleri aynı ağ tasarımında beraberce ele alınmıştır. Dikkate alınan ürünler için birden fazla parçalama yöntemi tanımlanarak aynı ürün için farklı geri kazanım seçenekleri daha ayrıntılı olarak incelenebilmiştir. Birden fazla geri dönüştürülebilir malzeme tipi tanımlanmıştır ve teknolojik kısıtlamalar dikkate alınarak her bir geri dönüşüm tesisinde işlenebilecek malzeme tipleri belirlenmiştir. Her ürün için birden

fazla yeniden üretilabilir parça tanımlanmıştır ve bu parçaların yalnızca o parçaya ihtiyaç duyan üretim tesislerine taşınması sağlanmıştır. İncelenen tersine lojistik literatüründe, tüm bu özellikleri aynı anda dikkate alan bir ağ tasarım problemine rastlanmamıştır.

Bu çalışmada tanımlanan tersine lojistikte ağ tasarımı probleminin çözümü için bir karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model, uygun parametre girişleri ile karar vericiye ağ tasarımında dikkate alacağı özellikler konusunda esneklik sunmaktadır. Çalışmada tanımlanan problem ve çözüm için önerilen karma tamsayılı matematiksel model çeşitli ağ tasarımlarında kullanılabileceği düşünülmektedir. Örneğin, ambalaj atıklarının geri dönüşümü için bir tersine lojistik ağının kurulmasında, bir belediyenin katı atıkları toplama ve geri dönüştürme sürecinin tasarlanmasında veya bir işletmenin müşterilerinden topladığı ve faydalı ömrünü doldurmuş ürünlerin en uygun geri kazanımını sağlamak amacıyla bir ağın kurulmasında kullanılabilir.

Geliştirilen modelin farklı büyüklüklerde ve farklı özelliklerde problemleri çözme performansının analizi amacıyla bir deneysel çalışma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelenmiştir ve gerek literatürdeki teorik çalışmalarda ve gerekse de uygulamada daha büyük boyutlu problemlerin geliştirilen matematiksel model kullanılarak çözülebilmesi amacıyla tavlama benzetimi yaklaşımı kullanılarak probleme sezgisel bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir ve deneysel problemler bu metotla çözümlenerek sonuçlar yorumlanmıştır. Bu çalışmada ele alınan problemin çözümü için geliştirilen tavlama benzetimi temelli çözüm yaklaşımının, farklı tersine lojistik ağ tasarım problemlerinin çözümünde de kullanılabileceği düşünülmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, tersine lojistik kavramı ve özellikleri tanıtılmıştır ve tersine lojistik konusunda literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Üçüncü bölümde, ele alınan problem detaylı olarak tanımlanmıştır, problemin çözümü için geliştirilen matematiksel model verilmiştir, deneysel çalışma anlatılmıştır. Çalışmanın dördüncü bölümünde, tavlama benzetimi ve bu çalışmada ele alınan problemin çözümü için başvuru metot detaylı olarak açıklanarak, bu metot

kullanılarak yapılan çözümler ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Beşinci bölümde, çalışmanın genel sonuçları değerlendirilmiştir.

2. TERSİNE LOJİSTİK VE İLGİLİ LİTERATÜR

Bu bölümde, öncelikle tersine lojistik kavramı ve bileşenleri tanıtılmıştır. Sonrasında ise bu konuda literatürde yapılmış çalışmalar ile ilgili bir özet çizelge sunulmuştur. Bu tez çalışmasının odak konusu olan tersine lojistikte ağ tasarımı konusunda yapılan çalışmalar ise detaylı olarak incelenmiştir.

2.1 Tersine Lojistik

Lojistik kavramı, literatürde çok çalışılmış, kavramsal ve uygulama yönünden çok örnekleri olan bir fenomendir. Lojistik Yönetimi Konseyine göre lojistik, “Hammadde, yarı mamul, mamul ve gerekli bilginin kaynaktan bir tüketim noktasına müşteri ihtiyaçlarının tatmini amacıyla etkin bir maliyetle taşınması işinin planlanması, uygulanması ve kontrol edilmesidir.” şeklinde tanımlanmıştır. Yine aynı konseye göre tersine lojistik, lojistik kavramının tanımından gelen tüm faaliyetlerin, değer korumak amacıyla müşteriden kaynak noktasına hareketi olarak tanımlanmaktadır. [Dowlatsahi, 2000]’de tersine lojistik kavramı, üreticinin, geri kazanmak, yeniden üretmek veya yok etmek için tüketim noktasından gönderilen ürün veya parçaları sistematik olarak kabul etmesi süreci olarak tanımlanmıştır [Dowlatsahi, 2000]. [Fleischmann ve ark., 1997]’ye göre, tersine lojistik, kullanıcı için gerekli olmayan kullanılmış ürünün, pazarda yeniden kullanılabilir ürün haline getirilmesine kadarki tüm lojistik aktivitelerini kapsayan bir süreçtir. Farklı bir tanımlama ile tersine lojistik, çevresel kaygılar veya kar amacı ile faydalı ömrünü doldurmuş, arızalanmış veya müşteri tarafından istenmeyen ürünlerin geri toplandığı, sistemin ihtiyaçları veya stratejik amaçlara göre farklı sayı ve konfigürasyonda depolar, toplama merkezleri, ayrıştırma merkezleri vb. öğelerden oluşan bir lojistik sisteminin tasarımı, işletilmesi ve bu sistemde geri kazanımın nasıl yapılacağının spesifik olarak belirlenmesi ve bu sistemin işletilmesi süreci olarak tanımlanabilir [Fleischmann ve ark., 1997]. Bu tanımlama, tersine lojistik sistemlerinin iki temel problemini yansıtmaktadır. Bunlardan ilki ağ tasarım problemidir, ikincisi ise geri dönen ürünlerin nasıl değerlendirileceğidir. Günümüzde pek çok şirket ileri yönlü lojistik sistemlerini oturtmuşlardır ve bu sistemlerdeki temel amaç, taşımalarından

doğan maliyetleri en küçükleme. Böylesi bir ileri yönlü lojistik sisteminin bir tersine lojistik ağı ile birleştirilmesinde, öncelikle bu iki sistemin bütünleştirilmesi ve koordinasyonu ile ilgili problemler ortaya çıkacaktır. Başka bir deyişle, bütünleşik bir tersine lojistik ağının kurulması ve çalıştırılması iki nedenle ileri yönlü bir lojistik ağı tasarımına göre daha zordur. İlk olarak, eşzamanlı bir şekilde birbirleriyle etkileşim halindeki iki akışın olmasıdır. Burada hem ileri yönlü hem de tersine lojistik için bütünleştirici ve sınırlayıcı kısıtların belirlenmesi gerekir. İkinci olarak ise, geri dönüşler konusundaki belirsizliklerdir. Geri dönen ürünlerin seçim kriterleri, kalite ve miktarları, tekrar işlem zamanları belirsizlik yaratmaktadır. Geri dönen ürünlerin nasıl değerlendirileceği de ikinci problem. Bir ürünün ne oranda geri dönüştürülebileceği, hangi parçalarının yeniden üretileceği ve yeniden üretimin nasıl bir çizelgede yapılacağı daha ürünün tasarım aşamasında belirlenmelidir. Ancak, ürünün kullanım şartları gibi kontrol edilemeyen nedenler dikkate alınırsa, geri dönen ürünlerin nasıl değerlendirileceği kararının da belirsizliklerle dolu olduğu görülür. Burada, tersine lojistik faaliyetleri devreye girmektedir.

Bir tersine lojistik sisteminde müşteriden geri alınan ürünler üzerinde çeşitli faaliyetler gerçekleştirilebilir. Bu faaliyetler, [Thierry ve ark., 1995]'de tamir, ürün yenileme, yeniden üretim, parça alma ve geri dönüşüm olarak sıralanmıştır. Geri alınan ürün üzerinde hangi faaliyet veya faaliyetlerin gerçekleştirileceği ürünün durumu ve tersine lojistik stratejisi ile belirlenir [Thierry ve ark., 1995]. Tersine lojistik faaliyetleri şöyle ifade edilebilir:

Tamir: Geri dönmüş ürünü yeniden çalışır hale getirmektir. Tamir edilen ürünün kalitesi yeni ürüne kıyasla daha düşük olacaktır. Tamir faaliyetine bir örnek olarak garanti kapsamında müşteriden geri dönen ürünlerin kırılan veya bozulan parçalarının yenilenmesi verilebilir. Tamir işleminin pek çok üretim ortamında nasıl yapılacağı belirlidir. Bu nedenle en kolay faaliyet olarak görülebilir. Tamir faaliyeti ile ilgili problemler, müşteri tatminini en büyükmek için tamir merkezlerinin yerleri ve sayılarının belirlenmesi, tamir işleminin bir dış kaynak tarafından yapılması kararının analiz edilmesi, tamir merkezlerindeki ürün, parça ve teçhizatın envanter kontrolü olarak özetlenebilir.

Ürün Yenileme: Tamir faaliyetinden farklı olarak geri dönen ürünün tam olmasa da yeni ürün kalitesine yakın bir duruma çıkartılabilmesi için gerekli olan işlemlerdir. Geri dönen ürün sökülür, test edilir, değiştirilmesi gereken parçalar değiştirilerek yeni ürün spesifikasyonlarında veya buna yakın bir ürün elde edilir. Ürün yenileme ile ürünün ömrü uzatılır. Ürün yenilemenin uygulama alanlarından birisi askeri araçlardır.

Yeniden Üretim: Kullanılmış ürünün tam olarak yeni ürün kalite ve spesifikasyonlarına yükseltilmesidir. Çoğunlukla ürünün parçalanması ile başlayan yeniden üretim süreci geri dönen ürün ve parçaların durumuna göre, yeniden işleme, tamir, değiştirme veya geri dönüşüm gibi seçenekler kullanılarak devam eder ve yeni ürün kalitesinde bir ürünün montajı ile sona erer. Burada, geri dönen ürünün tümü ya da yalnızca bir kısmı yeni ürünün yapısına katılır. Yeniden üretimin en büyük amacı, geri dönen ürünün, en büyük faydayı elde edecek şekilde yeniden kullanılmasıdır. Etkin bir yeniden üretim sisteminde karşılaşılabilecek pek çok problem vardır. [Guide Jr. ve ark., 2000]'de, bu problemler geri dönen ürünlerin ne zaman ve ne miktarda döneceğinin belirsiz olması, geri dönen ürünler ile talepleri dengeleme problemi, geri dönen ürünlerin ne miktarda geri kazanılabileceğinin belirsiz olması olarak özetlenmiştir [Guide Jr. ve ark., 2000]. [Ferrer, 2001]'de, yeniden üretim, daha verimli süreçler ve ürünler tasarlayarak enerji ve malzeme tüketimini azaltmak; mümkün olduğunca, ürünleri ve parçaları tekrar kullanmak; tekrar kullanılamayacak olanları ise geri dönüştürmek olarak ifade edilen üç işlemin bir kombinasyonu olarak ifade edilmiştir [Ferrer, 2001]. Aynı çalışmada, yeniden üretim sisteminin karlılığının, toplama, taşıma ve ürün talebi gibi içsel süreçler kadar, stok yönetimi, çizelgeleme ve kapasite kararlarına da bağlı olduğu belirtilmiştir [Ferrer, 2001]. [Guide Jr., 2000]'de, yeniden üretim, ürünler atılmak yerine yeniden kullanıldığı için bir atık önleme şekli olarak tanımlanmıştır ve tipik bir yeniden üretim sisteminin parçalama, işleme ve yeniden montaj olmak üzere üç alt sistemin birbiri ile koordinasyonundan oluştuğu belirtilmiştir [Guide Jr., 2000]. [Fleischmann ve ark., 2000]'de, giderek artan çevresel kaygıların bir uzantısı olarak ürünlerin ve malzemelerin yeniden kullanımına olan ilginin arttığı belirtilirken, endüstrileşmiş

ülkelerde atıkların azaltılmasının birincil derecede önemli hale geldiğinin altı çizilmiştir [Fleischmann ve ark., 2000].

Endüstride yeniden üretim uygulamaları 1990'lı yıllardan itibaren giderek artan bir seyir izlemektedir. [Guide Jr. ve ark., 2003]'de, Kodak firmasının tek kullanımlık fotoğraf makineleri, Xerox firmasının fotokopi makineleri, Amerikan Deniz Kuvvetleri'nin jet motorları için yeniden üretim yöntemlerini ve stratejilerini incelenmiştir. Buna göre, Kodak firmasında ürünler, tekrar kullanılabilir şekilde tasarlanmıştır, tek kullanımlık fotoğraf makinelerinin parça ve bileşenleri %77-80 oranında yeniden kullanılabilir. Aynı zamanda, bu ürünlerin küresel boyutta geri toplanma oranları da %60'dır ve 1990 yılından itibaren toplam 310 milyon fotoğraf makinesi toplanmıştır. Çalışmada, yeniden üretime örnek olarak verilen ikinci uygulama Xerox Europe şirkettir. Fotokopi makineleri üreticisi olan ve yıllık yaklaşık bir milyon talebi karşılayan bu şirket, 1991 yılında etkin bir yeniden üretim programı hazırlamıştır. Geri dönen ürünlerin, test edilerek kullanılabilirliklerine göre ayrıştırıldıkları bu programda, ürünlerin geri dönme oranı %65'dir. Yeniden üretime uygun tasarımlarla, şirketin ürünlerinin %90'ı yeniden üretilebilir hale getirilmiştir. Çalışmada incelenen üçüncü ve son yeniden üretim sistemi, Amerikan Deniz Kuvvetleri'nin jet motorları için tasarladığı sistemdir. Jet motorlarının çok karmaşık ve pahalı ürünler olduğu belirtilen çalışmada, yeniden üretim stratejisinin, ürünlerin faydalı ömürlerinin uzatılmasına yönelik olduğu belirtilmiştir [Guide Jr. ve ark., 2003].

Parça alma: Bazı durumlarda, geri dönen ürünün yalnızca bazı parçaların alınıp kalanının geri dönüştürülmesi tercih edilebilir. Üründen alınan bu parçalar yeniden işleme, tamir veya yeniden üretimde kullanılarak yeni ürünlerin yapısına katılırlar. Burada, sistem ürünün parçalanması ile başlar ve üründen alınacak parçaların test edilmesi, hangi parçanın alınıp hangisinin geri dönüştürüleceği kararlarının alınması, alınan parçaların stoklanması veya mevcut talebi karşılamada kullanılması kararları ile sonuçlanır. Böylesi bir sistemde pek çok belirsizlik olduğu için kalifiye işgücü gereksinimi duyar çünkü özellikle fonksiyonel parçaların kalite standartlarında olup olmadığı, mevcut talep veya beklenen talepler açısından alınan parçanın stoklanıp

stoklanmayacağı kararlarını vermek zordur. Bazı durumlarda bir parça sadece bir ürün veya ürün grubunda kullanılabildiği gibi bazı genel parçalar çok sayıda ürünün veya ürün grubunun yapısında bulunabilir. Literatürde parça alma ile daha çok yeniden üretim sisteminin bir bileşeni olarak karşılaşılmaktadır.

Geri Dönüşüm: Geri dönen ürünün tümü veya faydasız olan kısmının hammadde haline geri dönüştürülmesidir. Geri dönüşüm, malzeme cinsine göre farklı teknolojiler ve süreçler gerektirmektedir. Özellikle paketleme, şişeleme ve ambalajlamada karşılaşılmaktadır. Bunun yanında metal, çelik, alüminyum bileşik ve alaşımları bu yolla hammaddeye dönüştürülerek önemli ölçüde enerji ve doğal kaynak tasarrufu sağlanmaktadır. [Fleischmann ve ark., 1997]'de, 1994 yılında Avrupa'da kağıt geri dönüşümünün yıllık %7 artışla 27.7 milyon tona ulaştığı ve bu rakamın toplam tüketimin %43'ü olduğu; cam geri dönüşümünün yıllık %10 artışla 7 milyon ton olduğu ve bu miktarın toplam cam sarfiyatı içindeki payının %60 olduğu; Almanya'da paketleme malzemesi geri dönüşümünün zorunlu olduğu ve %60 ile %75 arasında değiştiği ve Hollanda'da 1994 yılında tüm endüstriyel atıkların %46'sının geri dönüştürüldüğü belirtilmiştir [Fleischmann ve ark., 1997]. [Le Blanc ve ark., 2004]'de, Hollanda'da ömrünü doldurmuş olan otomobillerin %86'sı oranında geri dönüştürüldüğü vurgulanmıştır. 1995'den beri aktif olan geri dönüşüm sistemiyle toplam 2.1 milyon aracın geri dönüştürüldüğü ve bu rakamın yalnızca 2001 yılında 285000 olduğu belirtilmiştir [Le Blanc ve ark., 2004]. [Louwers ve ark., 1999]'da, halı artıklarının geri dönüşümü konusu incelenirken, 1996 yılında yaklaşık 1.6 milyon ton halı artığının olduğu belirtilen çalışmada, yasal zorunluluklar ve kıymetli geri dönüşebilir malzeme dikkate alındığında Avrupa'daki halı şirketlerinin bir geri dönüşüm ağı ihtiyacı içinde oldukları dile getirilmiştir [Louwers ve ark., 1999]. [Sodhi ve Reimer, 2001], 1999 yılı verilerine göre bir ton elektronik atığın uygun yöntemlerle geri dönüştürülmesi ve elde edilen hammaddenin piyasa fiyatlarında satılması sonucu ortalama olarak 9193.46 \$ elde edilebileceğini belirtmiştir [Sodhi ve Reimer, 2001].

Tersine lojistik sistemlerinin kurulmasını, planlanmasını ve işletilmesini zorlaştıran pek çok özelliğinden bahsedilebilir. Zira bu özellikler tersine lojistik literatüründe

birer problem olarak ele alınarak çözülmeye çalışılmaktadır. [Guide Jr., 2000]'de, tersine lojistik sisteminde karşılaşılan belirsizlikler yedi maddede incelenmiştir. Bunlar: (i) Geri dönüşlerin belirsiz zaman ve miktarı, (ii) Geri dönen ürünleri taleplerle eşleme zorunluluğu, (iii) Geri dönen ürünlerin parçalanması, (iv) Geri dönen ürünlerden elde edilen malzemenin belirsizliği, (v) Bir tersine lojistik ağına olan ihtiyaç, (vi) Malzeme seçim kısıtları, (vii) Malzeme için stokastik rotalar ve oldukça değişken işlem zamanlarıdır [Guide Jr., 2000].

İlk olarak, tersine lojistikte ürünlerin müşterilerden ne zaman ne miktarda ve ne durumda geri döneceği belirsizdir. Bu belirsizlik, tersine lojistik ortamında karar vermeyi ve planlamayı zor kılmaktadır. Örneğin, müşterilerden geri dönen ürünlerin bir kısmı için yalnızca temizleme ve tamir yeterli olabilirken, çok kötü durumda dönen ürünler için uzun bir parçalama, yeniden işleme ve test süreci gerekebilmektedir. İşletmeler müşteri taleplerini karşılamak için mevcut üretimlerinin yanı sıra tersine lojistik faaliyetlerini de kullanırken, stok kontrolü, üretim planlama, montaj ve kapasite planlama gibi normal bir üretim ortamındakinden daha zor problemler ile karşılaşabilmektedirler. Tersine lojistiğin uygulanabilirliğini zorlaştıran bir diğer unsur da müşteri bağımlılığıdır. Çünkü ürünün geri gönderilmesi kararı sahibi olan müşteriye aittir. İşletmeler uygulamada bu zorlukları aşmak için çoğunlukla promosyon ve kampanyalara başvurmaktadırlar.

Yukarıda sayılan belirsizliklerle baş edebilmek için tersine lojistik sisteminde bazı sistem ihtiyaçları ortaya çıkmaktadır. [Patel, 2006]'da bu ihtiyaçlar belirlenmiştir.

Bu ihtiyaçlar şöyle sıralanabilir:

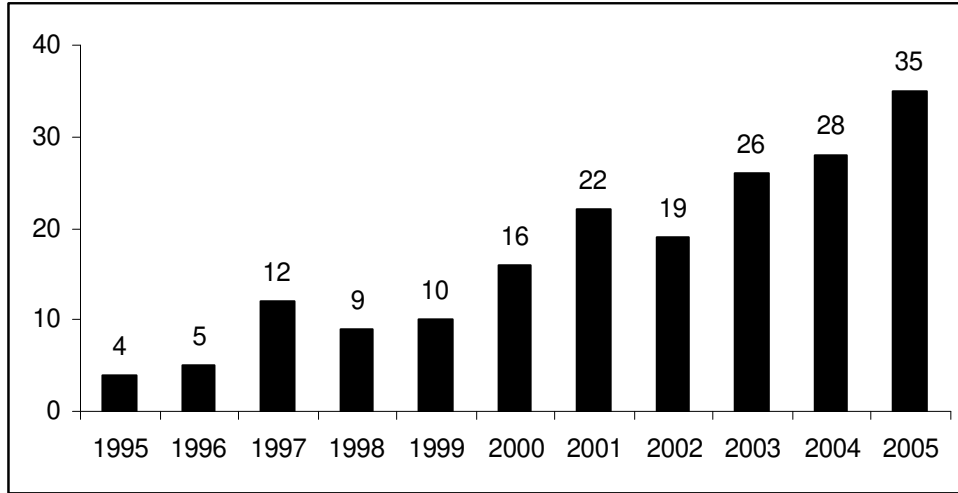
- Farklı çeşitlerdeki ürün tiplerini müşterilerden toplamak için etkin işlem gören toplama merkezlerine ihtiyaç vardır.
- Farklı çeşitlerde ve kalite düzeylerindeki ürünleri sınıflandırmak için esnek bir sınıflandırma sistemine ihtiyaç vardır.
- Sistemdeki belirsizliklerle başa çıkabilmek için esnek bir stok politikasına ihtiyaç vardır.

- Çevreye verilen zararı azaltmak ve geri dönen ürünleri bir an önce faydalı hale dönüştürmek için etkin bir çizelgeleme politikasına ihtiyaç vardır.
- Ürün bileşimleri hakkında detaylı bilgilere ihtiyaç vardır. Bu bilgiler doğru tersine lojistik faaliyetinin seçiminde kullanılabilecektir.
- Kurulacak sistemin taşıma, toplama, işleme gibi unsurlar açısından oldukça esnek olması gerekmektedir.
- Sistemdeki tüm birimlerin koordinasyonuna ihtiyaç duyulacaktır [Patel, 2006].

2.2. Literatür Araştırması

Tersine lojistik kavramı ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde 1990'lı yıllarda giderek artan bir ölçüde çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Konunun çevresel ve ekonomik boyutları düşünüldüğünde, ileri lojistik ile farklılıkları ele alındığında çok geniş bir çalışma alanı olduğu görülmektedir. Bu kadar geniş bir çalışma alanına sahip olması ve nispeten yeni bir konu olması nedenleriyle halen araştırılması gereken noktalar olduğu görülmektedir.

[Rubio ve ark., 2008], 1995-2005 yılları arasında tersine lojistik üzerine yapılmış ve prestijli dergilerde yayınlanmış çalışmaları incelemişlerdir ve sınıflandırmışlardır. Yıllar bazında tersine lojistik konusunda yapılan çalışmalar Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 1. 1995-2005 yılları arasında yapılan yayın sayıları [Rubio ve ark., 2008]

Çalışmada, belirtilen yıllar arasında yapılan çalışmalar metotları bakımından, literatür araştırması, matematiksel model, örnek olay çalışması, tümüyle teorik ve anket-araştırma olarak sınıflandırılmıştır. [Rubio ve ark., 2008], ele aldıkları çalışmaları, konularına göre, üç ana başlık altında sınıflandırmışlardır. Bunlar: (i) Faydalı ömrünü tamamlamış ürünlerin yönetimi ve dağıtımı, (ii) Üretim planlama ve stok yönetimi, (iii) Tersine lojistikte tedarik zinciri yönetimi konuları [Rubio ve ark., 2008].

Çizelge 2. 1. Çalışmaların konu ve metotlarına göre sınıflandırılması [Rubio ve ark., 2008]

Konu	Metot					Toplam (%)
	Örnek Olay(%)	Literatür Araştırması(%)	Matematiksel Model(%)	Anket-Araştırma (%)	Tümüyle Teorik(%)	
i	52,17	4,35	39,13	4,35	0,00	12,37
ii	6,67	0,95	92,38	0,00	0,00	56,45
iii	36,21	6,90	25,86	13,79	17,24	31,18
Toplam(%)	21,51	3,23	65,05	4,84	5,38	

Burada, tersine lojistik konusunda literatürde yapılan çalışmalar ve ele alınan problemler detaylı olarak incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken, [Rubio ve ark., 2008]'deki sistematik temel alınmıştır ancak 2005 yılından günümüze kadar yapılan

çalışmalar da bu sınıflandırmaya dahil edilmiştir. Öncelikle, literatürde tersine lojistik konusunda yapılan çalışmalarla ilgili özet bir çizelge sunulmuştur. Sonrasında ise, bu tez çalışmasında dikkate alınan problem ve çözüm yaklaşımlarına temel teşkil eden ve [Rubio ve ark., 2008]'de matematiksel model içeren çalışmalar olarak belirtilen kaynaklar detaylı olarak incelenmiştir. Tersine lojistik literatürünün özeti Çizelge 2.2'de görülmektedir.

Çizelge 2. 2. Tersine lojistik literatüründe yapılan çalışmaların özeti

Sınıflandırma	Çalışma	Amaç
Literatür Araştırmaları	[Fleischmann ve ark., 1997]	Tersine lojistik literatürü üç ana başlık altında (Tersine dağıtım ağ tasarımı, stok kontrol ve üretim planlama) olarak incelenmiştir.
	[Güngör ve Gupta, 1999]	Çevreye duyarlı üretim ve ürün geri kazanımı bağlamında tersine lojistiğin farklı özellikleri dikkate alınarak bir literatür araştırması yapılmıştır.
	[Fleischmann ve ark., 2000]	Tersine lojistikte ağ tasarımı konusu incelenmiştir,
	[Guide Jr., 2000]	Yeniden üretim ortamında üretim planlama ve kontrol konusunda yapılan çalışmalar ele alınmıştır.
	[De Brito ve ark., 2003]	Tersine lojistik konusunda örnek olay çalışmaları içeren çalışmalar incelenmiştir.
	[Demirel ve Gökçen, 2008]	Tersine lojistik ağlarının tasarımı ve modellenmesi üzerine literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir.
Anket - Araştırma Çalışmaları	[Guide Jr. ve Jayaraman, 2000]	Ürün geri kazanımı sürecinin yönetimi ile ilgili bir çerçeve sunulmuştur.
	[Guide ve Jayaraman, 2000]	Ürün geri kazanımı sürecinin yönetimi ile ilgili bir çerçeve sunulmuştur.
	[Gonzales-Torre ve ark., 2004]	İspanya ve Belçika'daki yiyecek ve içecek pazarındaki şirketler ile bunların tedarikçileri ve müşterileri ile olan ilişkileri tersine lojistik bakış açısından incelenmiştir.
	[Richey ve ark., 2005]	Amerikan otomobil kullanım sonrası endüstrisi çalışma alanı olarak seçilmiştir.

Çizelge 2. 2 (Devam) Tersine lojistik literatüründe yapılan çalışmaların özeti

Sınıflandırma	Çalışma	Amaç
Anket - Araştırma Çalışmaları	[Autry, 2005]	Amerikan otomobil kullanım sonrası endüstrisi üzerine bir çalışma yapılmıştır.
	[Kumar ve Putnam, 2008]	Otomotiv, tüketici ürünleri ve elektronik sektörlerinin, gerek hükümetler ve gerekse de pazar tarafından kendilerine getirilen çevreci yükümlülükler konusunda bir araştırma yapmışlardır.
Örnek Olay İçeren Çalışmalar	[Krikke ve ark., 1999a]	Dayanıklı tüketim malları için bir tersine lojistik ağı tasarımı amacıyla bir karma tamsayı model ortaya konmuştur.
	[Krikke ve ark., 1999b]	Hollanda'nın Rotterdam şehrinde belediyeye ait atık şirketinde PC monitörlerinin geri dönüşümü ve parçalanması üzerine bir örnek olay çalışması yapmışlardır.
	[Nagel ve Meyer, 1999]	Tersine lojistik, parçalama ve geri dönüşüm konularında Fraunhofer IML'nin uygulamalarını incelemişlerdir.
	[Ferrer, 2001]	Etkin bir yeniden üretim süreci için bir çerçeve sunulmuştur.
	[Guide Jr. ve ark., 2003]	Üç farklı örnek olay çalışması incelenerek yeniden üretim ortamında üretim planlama ve kontrolü için çeşitli yargılara varılmıştır. İncelenen örnek olay çalışmaları sırasıyla, Kodak firmasının tek kullanımlık fotoğraf makineleri, Xerox firmasının fotokopi makineleri, Amerikan Deniz Kuvvetleri'nin jet motorlarıdır.
	[De Brito ve Dekker, 2003]	Ürün geri dönüşlerini stok kontrolü perspektifinden incelemişlerdir. Örnek olay çalışmalarını CERN'de yapmışlardır.
	[Le Blanc ve ark., 2004]	Hollanda'da ömrünü doldurmuş olan otomobillerin geri dönüşümünün yapıldığı bir şirket olan ARN'de bir örnek olay çalışması yapılmıştır.
	[Hicks ve ark., 2004]	Atık kavramının değişik perspektiflerden tanımlaması yapılmış ve tedarik zincirlerinde atık yönetiminin optimizasyonu için bir fonksiyonel model geliştirilmiştir.
	Dowlathshahi (2005)	Tersine lojistik sisteminin etkin tasarımı ve uygulanması için gerekli ve kritik olan faktörleri belirleyerek, bu faktörler ışığında ortaya konan çerçevenin geçerliğini iki şirket üzerinde yapılan örnek olay çalışmalarıyla ortaya koymuştur.
	[Guide Jr. ve ark., 2005]	Amerikan Deniz Kuvvetlerine ait bir işletmede jet türbin motorlarının yeniden üretimi incelenmiştir.

Çizelge 2. 2 (Devam) Tersine lojistik literatüründe yapılan çalışmaların özeti

Sınıflandırma	Çalışma	Amaç
Örnek Olay İçeren Çalışmalar	[Ravi ve Shankar, 2005]	Tersine lojistiğin önündeki engellere değinilmiştir ve Hindistan otomobil pazarı dikkate alınmıştır.
	[Shultmann ve ark., (2006)]	Almanya’da ömrünü doldurmuş olan otomobillerin geri dönüşümü, araç rotalama problemi çerçevesinde bir çalışma yapılmıştır.
	[Cruz-Rivera ve Ertel, 2009]	Meksika’da kullanım ömrünü doldurmuş araçların geri toplanması süreci incelenmiştir.
	[Weeks ve ark., 2010]	Atık çelik endüstrisinde, iki farklı tersine lojistik stratejisi karlılığa olan etkileri boyutunda analiz edilmiştir.
	[Achillas ve ark., 2010]	Yunanistan’da, elektriksel ve elektronik atıkların işleneceği tesislerin konumları için bir karar destek sistemi sunulmuştur.
Matematiksel Model İçeren Çalışmalar	[Louwers ve ark., 1999]	Halı artıklarının geri dönüşümü ile ilgili bir tersine lojistik ağ tasarımı yapılmıştır.
	[Jayaraman ve ark., 1999]	Yeniden üretim yapan bir işletme için yeniden üretim / dağıtım tesislerinin yeri ve yeniden üretilmiş ürünler için optimal taşıma, üretim ve stoklama miktarlarını veren, 0-1 karma tamsayılı bir model geliştirilmiştir.
	[Shih, 2001]	Tayvan’da bilgisayarların ve diğer donanımın geri alınması, geri dönüştürülmesi ve elde edilen malzemenin satışını dikkate alan karma tamsayılı bir matematiksel model geliştirilmiştir.
	[Dethloff, 2001]	Tersine lojistiği, araç rotalama problemi perspektifinde incelemiştir. İleri yönlü ve tersine dağıtımın eşzamanlı olarak incelendiği bir karma tamsayılı bir model ortaya koymuştur.
	[Sodhi ve Reimer, 2001]	Elektronik ürünlerin geri dönüşümü için tersine lojistik kanallarını incelemiştir.
	[Hu ve ark., 2002]	Zararlı atıkların işlendiği bir tersine lojistik sistemi ele alınmıştır ve maliyet enküçüklemesi amacını taşıyan çok dönemli, çok ürünlü bir doğrusal matematiksel model geliştirilmiştir.
	[Jayaraman ve ark., 2003]	Tersine dağıtım sistemleri ele alınmıştır ve karma tamsayılı bir matematiksel model kurulmuştur.
	[Okumura ve ark., 2003]	Bir yeniden üretim sistemi için stokastik, doğrusal olmayan bir matematiksel model geliştirilmiştir.
	[Bufardi ve ark., 2004]	Faydalı ömrünü doldurmuş ürünler için en iyi alternatifin belirlenmesinde ekonomik, çevresel ve sosyal bakış açılarını içinde barındıran çok amaçlı bir karar destek sistemi sunmuşlardır.

Çizelge 2. 2 (Devam) Tersine lojistik literatüründe yapılan çalışmaların özeti

Sınıflandırma	Çalışma	Amaç
Matematiksel Model İçeren Çalışmalar	[Beamon ve Fernandes, 2004]	Kullanılmış ürünlerin toplanması, yeniden işlenmesi ve müşterilere dağıtılması işlemlerinin yapıldığı bir ürün geri kazanım ağı incelenmiştir.
	[Sheu ve ark., 2005]	İleri yönlü ve tersine lojistik faaliyetlerinin beraberce ele alındığı çok amaçlı bir doğrusal matematiksel model kurulmuştur.
	[Min ve ark., 2006]	Beta.com ismi verilen ve bilgisayar satışı yapan bir e-ticaret şirketi için tüketicilerden geri dönen ürünler dikkate alınarak bir tersine lojistik ağ tasarımı yapılmıştır.
	[Ahluwalia ve Nema, 2006]	Kullanılmış ve ömrünü doldurmuş olan bilgisayarların oluşturduğu atıklar için bir atık yöntem sistemi planlaması ve tasarımı yapılmıştır.
	[Kim ve ark., 2006]	Bir üreticinin mevcut talebi karşılamak için bir dış tedarikçiye ürün siparişi vermek ya da geri dönen ürünleri yeniden üretimle kullanılabilir hale getirmek gibi iki seçeneği olduğu bir tersine lojistik sistemi ele alınmıştır.
	[Sheu, 2007]	Tehlikeli atıklar için bir tersine lojistik ağ yapısı için, birbiriyle çelişen iki amaç, operasyonel maliyetlerin enküçüklenmesi ve risklerin enküçüklenmesi, için çok amaçlı bir doğrusal model geliştirilmiştir.
	[Salema ve ark., 2007]	[Fleishmann ve ark., 2001]'de ele alınan ağ tasarım modeli incelenmiştir ve bu modelin eksiklikleri olarak değerlendirilen çok ürünlülük, limitli kapasiteler ve talep ile geri dönüşlerdeki belirsizlikler ortaya konulan karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ile ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır.
	[Lu ve Bostel, 2007]	Hem ileri yönlü ve hem de tersine lojistiğin beraberce ele alındığı iki aşamalı bir 0-1 karma tamsayılı model sunulmuştur.
	[Demirel ve Gökçen, 2007]	Tersine lojistik ağ tasarımı problemi, bir karma tamsayılı doğrusal model geliştirilerek incelenmiştir.
	[Biehl ve ark., 2007]	Tersine lojistik ağ tasarımı konusu, sistemdeki belirsizliklere özellikle dikkat çekilerek bir simülasyon modeli yardımıyla incelenmiştir.
	[Chan, 2007]	Geri toplanabilen paketleme malzemesinin elektronik sektöründe hizmet veren bir üretici ve bir OEM firma arasındaki tersine lojistiği ile ilgili bir örnek olay çalışması yapılmıştır.

Çizelge 2. 2 (Devam) Tersine lojistik literatüründe yapılan çalışmaların özeti

Sınıflandırma	Çalışma	Amaç
Matematiksel Model İçeren Çalışmalar	[Kara ve ark., 2007]	Sidney metropolünde faydalı ömrünü doldurmuş ürünlerin toplanmasıyla ilgili bir tersine lojistik ağı, bir simulasyon modeli yardımıyla incelenmiştir.
	[Sheu, 2008]	Nükleer güç üretimi ve bunun sonucunda karşılaşılan nükleer atıkların akıbeti problemi ele alınmıştır.
	[Srivastava, 2008]	Tersine lojistikte ağ tasarımı problemi önce kavramsal olarak modellenerek böylesi bir sistem için gereklilikler belirlenmiş, sonrasında ise karma tamsayılı bir matematiksel modelleme yapılmıştır.
	[Mansour ve Zarei, 2008]	İşletmeler, toplama tesisleri, parçalayıcılardan oluşan ve malzeme akışlarının çok dönemli olarak incelendiği bir problem yapısı için iteratif bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.
	[Figueiredo ve Mayerle, 2008]	Tersine lojistikte ağ tasarımı problemi incelenmiştir ve bir analitik model sunulmuştur.
	[Pishvae ve ark., 2009]	İleri yönlü ve tersine lojistiğin beraberce ele alındığı bir problem için öncelikle bir karma tamsayılı matematiksel model öne sürülmüştür.
	[Wadhwa ve ark., 2009]	Müşterilerden geri gelen ürünlerin en doğru şekilde değerlendirilmesi amacıyla, bulanık küme teorisi kullanılarak bir yaklaşım geliştirilmiştir.
	[Kim ve ark., 2009]	Güney Kore’de tüketici elektroniği geri toplanması problemi, araç rotalama perspektifinden incelenmiştir.
	[Easwaran ve Üster, 2010]	Çok ürünlü, ileri ve tersine lojistiğin beraberce ele alındığı bir problem için bir matematiksel model geliştirilmiştir.
	[Sasikumar ve ark., 2010]	Kamyon tekerleklerinin yeniden üretimi için çok dönemli bir matematiksel model öne sürülmüştür.

Çizelge 2.2’de, tersine lojistik konusunda yapılmış çalışmalar, literatür araştırmaları, anket-araştırma çalışmaları, örnek olay içeren çalışmalar ve matematiksel model içeren çalışmalar olarak bölümlenerek özetlenmiştir. Bu tez çalışmasının amacı çok ürünlü ve farklı geri kazanım seçenekleri için tersine lojistikte ağ tasarımı problemi için genel bir çözüm yaklaşımı geliştirmek olduğu için, matematiksel model içeren çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir.

[Louwers ve ark., 1999]’da, halı artıklarının geri dönüşümü ile ilgili bir tersine lojistik ağ tasarımı yapılmıştır. 1996 yılında yaklaşık 1.6 milyon ton halı artığının

olduğu belirtilen çalışmada, yasal zorunluluklar ve kıymetli geri dönüşebilir malzeme dikkate alındığında Avrupa'daki halı şirketlerinin bir geri dönüşüm ağı ihtiyacı içinde oldukları dile getirilmiştir. Böylesi bir ağda halılar kullanıcılarından alınarak tekrar kullanılabilir hammadde haline getirilecektir. Ama halılar ev, ofis vb. gibi çok farklı kaynaklardan gelecekleri için ciddi bir ayrıştırmaya tabi tutulmalıdırlar ve kolay taşınılabılır bir hale getirilmelidirler. Çalışmanın temel amacı, yatırım maliyeti, işlem maliyeti ve taşıma maliyetleri göz önüne alınarak bölgesel toplama merkezlerinin yerleri ve kapasitelerinin belirlenmesidir. Çalışmada lineer olmayan bir model ortaya konarak bu amaçlar en iyilenmeye çalışılmıştır [Louwers ve ark., 1999].

[Jayaraman ve ark., 1999]'da, yeniden üretim yapan bir işletme için yeniden üretim / dağıtım tesislerinin yeri ve yeniden üretilmiş ürünler için optimal taşıma, üretim ve stoklama miktarlarını veren, 0-1 karma tamsayılı bir model geliştirilmiştir. Yazarlar tarafından *REVLOG* ismi verilen bu model, çeşitli senaryolar için çözülmüştür ve elde edilen sonuçlar yönetici perspektifinden yorumlanmıştır [Jayaraman ve ark., 1999].

[Shih, 2001]'de, Tayvan'da kullanılmış bilgisayarların geri alımına yönelik olarak hükümetin koyduğu bir yasaya değinilmiş ve bilgisayarların ve diğer donanımın geri alınması, geri dönüştürülmesi ve elde edilen malzemenin satışını dikkate alan karma tamsayılı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Tayvan'da, üreticilerin ve ithalatçıların satılan bilgisayar başına 20 \$ atık ücreti ödediklerinin altı çizilen çalışmada, bu ülkede her yıl yaklaşık 500000 bilgisayarın ömrünü doldurduğunu belirtilerek ülkede mevcut geri dönüşüm yöntemleri ve ağı tanımlanmıştır. Ortaya konulan matematiksel modelin amacı toplam maliyetleri enküçüklemektir. Elde edilen model, yüzde 30,50 ve 70 oranlarındaki geri dönüşler için denemiştir ve sonuçlar yorumlanmıştır [Shih, 2001].

[Dethloff, 2001], tersine lojistiği, araç rotalama problemi perspektifinde incelemiştir. İleri yönlü ve tersine dağıtımın eşzamanlı olarak incelendiği bir karma tamsayılı bir model ortaya koymuştur. NP-zor yapıda olduğu belirtilen modelin çözümü için bir

sezgisel yöntem önermiştir. Üretilen test problemleri ile mevcut modelin ve çözüm için önerilen sezgiselin etkinliğini test etmiştir [Dethloff, 2001].

[Sodhi ve Reimer, 2001], elektronik ürünlerin geri dönüşümü için tersine lojistik kanallarını incelemişlerdir. Elektronik ürünlerin geri dönüşümünü zorunlu kılan yasal düzenlemelere yer verilen çalışmada, bu ürünlerin metal, plastik vb. gibi ortalama bileşenleri ortaya konmuştur. Çalışmada, 1999 yılı verilerine göre bir ton elektronik atığın uygun yöntemlerle geri dönüştürülmesi ve elde edilen hammaddenin piyasa fiyatlarında satılması sonucu ortalama olarak 9193.46 \$ elde edilebileceğinin altı çizilerek, bu konunun önemine vurgu yapılmıştır. Altın, gümüş ve paladyum gibi değerli metalleri yapısında bulunduran elektronik atıklar için ürün geri kazanımı, parçalama ve geri dönüşümün incelendiği modeller kurulmuştur. Çalışmada ele alınan ilk model, zararsız malzemenin çöp olarak atılmasıdır. Amerika Birleşik Devletleri'nde bir ton atık için 40-70 dolar arasında bir atık maliyeti söz konusu olduğu vurgulanırken, kurulan modeldeki amaç bu maliyeti taşıma maliyetleri dikkate alınarak minimize etmektir. İkinci modelde, geri dönüşüm yapan bir şirket için hangi malzemelerin toplanmaya değer olduğu ve bunların geri dönüşüm amacıyla hangi işlem merkezine gönderileceği kararları alınmaktadır. Ortaya konan bu model, doğrusal olmayan karma tamsayılı bir matematiksel modeldir. İkinci modelle ilgili olarak, bilgisayar, video ve televizyon örnekleri incelenmiştir ve GAMS yazılımı kullanılarak çözülerek sonuçlar sunulmuştur. Çalışmada incelenen üçüncü model, parçalama faaliyetlerinin dikkate alındığı bir geri dönüşüm ortamıdır. Bu model, ikinci modele parçalama maliyetlerinin eklenmesi ile oluşturulmuştur ve modelin amacı bu maliyetleri minimize etmektir. Çalışmada ele alınan son model, işlem merkezinin toplam karını, minimum geri dönüştürülmesi gereken malzeme miktarı ve kapasite kısıtları altında eniyilemek amaçlıdır. Bu model de lineer olmayan karma tamsayılı bir matematiksel modeldir [Sodhi ve Reimer, 2001].

[Hu ve ark., 2002]'de, zararlı atıkların işlendiği bir tersine lojistik sistemi ele alınmıştır ve maliyet enküçüklemesi amacını taşıyan çok dönemli, çok ürünli bir doğrusal matematiksel model geliştirilmiştir. Çalışmada ele alınan tersine lojistik ağı, toplama, depolama, işleme ve dağıtım işlemlerinden oluşmaktadır. Model

parametrelerinin belirlenmesinde, Tayvan'ın Nan-Tzi Endüstriyel Bölgesinde kurulu olan beş adet ileri teknoloji şirketi üzerinde inceleme yapılmıştır. Öne sürülen model dört farklı durum için çalıştırılarak sonuçlar yorumlanmıştır [Hu ve ark., 2002].

[Jayaraman ve ark., 2003]'de, tersine dağıtım sistemleri ele alınmıştır ve karma tamsayılı bir matematiksel model kurulmuştur. Çalışmada ileri yönlü lojistikten bağımsız olarak yalnızca tersine lojistik modellenmiştir. Modelin amacı, tersine lojistik maliyetlerini enküçükmektir. Modelde, müşterilerden ürünlerin geri alındığı ön toplama merkezleri, toplama merkezleri ve yeniden üretim, geri dönüşüm veya imha seçeneklerinin kullanıldığı işlem merkezlerinin sayısı ve yeri dikkate alınmıştır. Modelin girdileri taşıma maliyetleri, ön toplama merkezi, toplama merkezi ve işlem merkezi açma maliyetleri, bunların kapasiteleridir. Problemin çözümünde sezgisel bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada yirmi adet rassal problem üretilmiş ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir [Jayaraman ve ark., 2003].

[Okumura ve ark., 2003]'de, ürün bileşenlerinin yeniden kullanımının doğal kaynakları korumak adına etkili bir yol olduğunun altı çizilerek, bir yeniden üretim sistemi için stokastik, doğrusal olmayan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geri dönen ürünlerin fonksiyonel hatalı ve işlevsel hatalı olarak ayrıldığı çalışmada, fonksiyonel hataya örnek olarak bir içecek şişesinin boşalması, tek kullanımlık bir fotoğraf makinesinin pozunun bitmesi verilirken; işlevsel hata olarak da bir içecek şişesinin kırılması, fotoğraf makinesinin bozulması verilmiştir. Ele alınan yeniden üretim sisteminin detaylı olarak anlatıldığı çalışmada, çevresel etkenler de dikkate alınmıştır. Kurulan model çeşitli senaryolar kurularak çalıştırılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir [Okumura ve ark., 2003].

[Bufardi ve ark., 2004], faydalı ömrünü doldurmuş ürünler için en iyi alternatifin belirlenmesinde (geri dönüşüm, yeniden kullanım, vb.) ekonomik, çevresel ve sosyal bakış açılarını içinde barındıran çok amaçlı bir karar destek sistemi sunmuşlardır. Bir tersine lojistik sisteminde, sistem ihtiyaçları göz önüne alınarak birbiriyle çelişen amaçlar için en iyi stratejinin belirlenmesinde öne sürülen bu yöntem, adım adım anlatılmıştır. Ortaya koyulan yöntem, elektrik süpürgesi örneği üzerinde analiz edilmiştir [Bufardi ve ark., 2004].

[Beamon ve Fernandes, 2004]'de, kullanılmış ürünlerin toplanması, yeniden işlenmesi ve müşterilere dağıtılması işlemlerinin yapıldığı bir ürün geri kazanım ağı incelenmiştir. Çalışmada, ileri yönlü ve tersine lojistik faaliyetleri bir arada incelenmiştir. Artan üretim miktarları ile giderek artan kirliliğe vurgu yapılan çalışmada, deterministik, çok dönemli, karma tamsayılı bir doğrusal model kurulmuştur. Modelde amaç, sonlu sayıda mümkün yerleşim yeri içinde, maliyetleri enküçükleyecek şekilde depo ve toplama merkezlerinin nerelere açılması gerektiğinin belirlenmesidir. Çalışmada tersine lojistik faaliyeti olarak yalnızca yeniden üretim seçeneği dikkate alınmıştır. Modelde, depo ve toplama merkezlerinin kısıtlı kapasitelerle işlem yaptığı, yeniden üretim sonucu elde edilen ürünün yeni ürün ile tümüyle aynı olduğu, yasal zorunluluklar nedeniyle geri dönen tüm ürünlerin yeniden üretime konu olduğu, yeniden üretilen ve yeni ürünlerin aynı stok tutma maliyetleri ile incelendiği, yeniden üretim maliyetlerinin sabit olduğu, amaç fonksiyonunda gelirler dikkate alınmaksızın yalnızca maliyetlerin incelendiği varsayımları öne sürülmüştür. Modelin sonuçları ve geçerliği, çeşitli senaryolar oluşturularak denenmiştir. Elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır [Beamon ve Fernandes, 2004].

[Sheu ve ark., 2005]'de, ileri yönlü ve tersine lojistik faaliyetlerinin beraberce ele alındığı çok amaçlı bir doğrusal matematiksel model kurulmuştur. Ele alınan sistem, ileri yönlü ve tersine lojistik aktörlerini dikkate almaktadır. İleri yönlü lojistikte, hammadde tedariki, üretim, toptancı, perakendeci ve müşteri; tersine lojistikte ise, toplama noktaları, geri dönüşüm işletmeleri, ikincil malzeme pazarları ve atık noktaları dikkate alınmıştır. Çalışma, deterministik yapıdadır. Tersine lojistikteki belirsizlikler dikkate alınmamıştır. Kurulan model, Tayvan'da hizmet vermekte olan bir dizüstü bilgisayar şirketi için çalıştırılmıştır. Mevcut tedarik zincirine göre, karlılıkta %21.1'lik bir artış sağlanmıştır [Sheu ve ark., 2005].

[Min ve ark., 2006]'da, Beta.com ismi verilen ve bilgisayar satışı yapan bir e-ticaret şirketi için tüketicilerden geri dönen ürünler dikkate alınarak bir tersine lojistik ağ tasarımı yapılmıştır. Doğrusal olmayan bir karma tamsayılı model ortaya konulan çalışmada, modelin amacı olarak tersine lojistik maliyetlerinin enküçüklenmesi

seçilmiştir. Modelde, toplama merkezleri ve geri dönüş merkezlerinin optimal yerleri, sayıları ve büyüklükleri hizmet gereklilikleri ve kapasite kısıtları altında incelenmiştir. Ortaya konulan modelin çözümü için bir genetik algoritma önerilmiştir. Genetik algoritma ile ilgili detaylı bilgilerin verildiği çalışmada, çeşitli girdi değerleri ile duyarlık analizleri de yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir [Min ve ark., 2006].

[Ahluwalia ve Nema, 2006]'da, kullanılmış ve ömrünü doldurmuş olan bilgisayarların oluşturduğu atıklar için bir atık yönetim sistemi planlaması ve tasarımı yapılmıştır. Sistemin toplam maliyetlerini enküçüklemek ve çevresel riskleri enküçüklemek amaçlarını sağlamak üzere doğrusal bir tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Böylesi bir sistemde ortaya çıkacak olan maliyetler, taşıma, ayrıştırma, depolama, işleme ve atık maliyetleri olarak belirlenmiştir. Öne sürülen modelin karar değişkenleri ise taşınan atık miktarları, işlem merkezlerinin yerleri ve her bir işlem merkezinde işlem gören, depolanan veya atılan miktarlardır. Belli kapasite kısıtları altında incelenen model, Delhi şehrindeki bilgisayar atıkları için denenmiştir. Halihazırda, Delhi şehrinde bilgisayar atıklarının geri dönüştürülmesi işleminin sistematik olmayan bir şekilde yapıldığının altı çizilen çalışmada, ele alınan örnek problem için her bir bilgisayar parçasının birim taşıma maliyetleri ve çevreye zarar verme potansiyelleri girdi olarak alınmıştır. Modelin iki amacına farklı ağırlıklar verilerek yapılan çözümler değerlendirilmiştir ve duyarlık analizleri yapılarak derinlemesine incelemelerde bulunulmuştur [Ahluwalia ve Nema, 2006].

[Kim ve ark., 2006]'da, bir üreticinin mevcut talebi karşılamak için bir dış tedarikçiye ürün siparişi vermek ya da geri dönen ürünleri yeniden üretimle kullanılabilir hale getirmek gibi iki seçeneği olduğu bir tersine lojistik sistemi ele alınmıştır. Çalışmada tanıtılan tersine lojistik sistemi, faydalı ömrünü dolduran ürünlerin müşterilerden geri dönmesi ve toplama merkezlerinde biriktirilmesi; parçalanması; yeniden üretimin gerçekleştirilmesi ve yeniden üretim kısıtının aşılması durumunda anlaşmalı bir yeniden üretim tesisine gönderilmesi süreçlerini içermektedir. Toplama merkezinde temizlenen ürünlerin parçalanması yapılmaktadır ve parçalar, yeniden kullanılabilir veya kullanılamaz olarak ayrılmaktadır.

Kullanılabilir olanlar yeniden üretime tabi tutulmakta, kalanlar ise atılmaktadır. Çalışmada, tanıtılan bu sistem için tamsayılı bir doğrusal model kurulmuştur. Modelin amacı, yeniden üretim maliyetlerinin enküçüklenmesidir. Bir sayısal örnek üzerinde model çalıştırılmıştır. Sayısal örnek, üç tip ürün ve bu ürünlerden elde edilen beş tip parça içermektedir ve on dönemlik bir planlama ufku varsayılmıştır. Modele ait girdi değişkenleri belirlenerek model çözülmüştür ve yapılan duyarlılık analizleri ile sonuçlar yorumlanmıştır [Kim ve ark., 2006].

[Sheu, 2007]'de, tehlikeli atıklar için bir tersine lojistik ağ yapısı için, birbiriyle çelişen iki amaç, operasyonel maliyetlerin enküçüklenmesi ve risklerin enküçüklenmesi, için çok amaçlı bir doğrusal model geliştirilmiştir. Modelin bileşenleri, toplama, depolama, işlem, dağıtım, atık ve geri dönüşümdür. Elde edilen modelle sayısal örnekler çözülmüştür. Değerlendirilen sonuçlara göre, modelin ikinci amacı olan risk enküçüklenmesi dikkate alınmadığı duruma göre, çok amaçlı model toplam operasyonel maliyetlerde %58'lik bir azalış sağlamıştır [Sheu, 2007].

[Salema ve ark., 2007]'de, [Fleishmann ve ark., 2001]'de ele alınan ağ tasarım modeli incelenmiştir ve bu modelin eksiklikleri olarak değerlendirilen çok ürünlülük, limitli kapasiteler ve talep ile geri dönüşlerdeki belirsizlikler ortaya konulan karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ile ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Çalışmada, Portekiz'de iş yapmakta olan ofis makineleri üreticisi bir şirkete ait gerçek veriler kullanılarak [Fleishmann ve ark., 2001]'de sunulan model test edilmiştir. Sonrasında ise, bu modele sırasıyla kapasite kısıtları, çok ürünlülük ve belirsizlik eklenmiştir ve aynı verilerle aynı problem tekrar çözülmüştür. Belirsizlik kısıtları altında farklı senaryolar denenerek sonuçlar yorumlanmıştır [Salema ve ark., 2007].

[Lu ve Bostel, 2007]'de, hem ileri yönlü ve hem de tersine lojistiğin beraberce ele alındığı iki aşamalı bir 0-1 karma tamsayılı model sunulmuştur. Modelde ele alınan ağ tasarım problemi, müşteriler, temizleme, test ve ayrıştırma yapan ara birimler, yeniden üretim merkezleri ve üreticilerden oluşmaktadır. Modelde, talepler ve geri dönüş oranları deterministik kabul edilmiştir. Modelde amaç, üreticiler, yeniden

üretim merkezleri ve ara birimlerin sayılarını ve yerlerini toplam maliyetleri enküçükleyecek şekilde tespit etmektir. Problemin çözümünde Lagrange sezgisel yöntemlerinden yararlanılmıştır. Elde edilen model öncelikle 12 aday nokta içeren küçük boyutlu bir problem için çözülmüştür. Ardından, daha büyük boyutlu problemler için çözümler yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır [Lu ve Bostel, 2007].

[Demirel ve Gökçen, 2007]'de, tersine lojistik ağ tasarımı problemi, bir karma tamsayılı doğrusal model geliştirilerek incelenmiştir. Ele alınan problem, çok sayıda ürün ve çok sayıda üretim tesisinin olduğu bir ortamda, toplama merkezleri ve ayrıştırma merkezlerinin açılması maliyetleri ile dağıtım işlemlerinin toplam maliyetinin enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Problem verileri deterministik olarak alınırken, düşük, orta ve yüksek geri dönüş oranlarına göre senaryo analizleri yapılmıştır. Çalışmada, öne sürülen modelin bir örnek problem üzerinde incelemesi de yapılmıştır [Demirel ve Gökçen, 2007].

[Biehl ve ark., 2007]'de, tersine lojistik ağ tasarımı konusu, sistemdeki belirsizliklere özellikle dikkat çekilerek bir simulasyon modeli yardımıyla incelenmiştir. Halı endüstrisinde geri dönüştürülmek üzere müşterilerden geri alınan ürünlerin incelendiği çalışmada, merkezi veya merkezi olmamasına göre ağ yapısı, belirsizliğin çok büyük olduğu geri dönüş oranları, geri dönüş oranlarında ve sistem üzerindeki diğer parametrelerin belirlenmesinde önemli katkı sağlayan bilgi teknolojilerinin desteği, ürün tasarımı konuları kritik parametreler olarak kabul edilmiştir. Elde edilen modelin 48 farklı parametre için çözülmesi ve sonuçların analiz edilmesi sonucunda, tersine lojistik ağ yapısının iyi belirlenmesi ve bilgi teknolojilerine yatırım yapılması; toplama merkezlerinin sayısının artırılması ve ürün geri dönüşlerindeki belirsizliklerin azaltılması için metotlar geliştirilmesinin etkin bir tersine lojistik yönetimi için gerekli olduğu sonuçlarına varılmıştır [Biehl ve ark., 2007].

[Chan, 2007]'de, geri toplanabilen paketleme malzemesinin elektronik sektöründe hizmet veren bir üretici ve bir OEM firma arasındaki tersine lojistiği ile ilgili bir örnek olay çalışması yapılmıştır. Paketlemede, aşağıdaki kriterler kullanılmıştır:

- Paketlemenin temel amacı ürünü korumaktır;
- En düşük birim maliyeti sağlamak için en az miktarda malzeme kullanılmalıdır;
- Paketlenmiş bir birim ürünün hacmi, taşıma maliyetlerini azaltmak için enküçüklenmiştir;
- Stok maliyetlerini en aza indirmek için her defasında gerektiği kadar ürün taşınacaktır;
- İşçilerin kolay taşınması için paketlenmiş bir birim ürünün ağırlığı en fazla 13.5 kg olacaktır;
- Mümkün olduğunca geri dönüştürülebilir malzeme kullanılacaktır [Chan, 2007] .

Tersine lojistik yaklaşımının geliştirilmesinde ise paketlemede daha dayanıklı malzemelerin kullanılması, paketleme maliyetlerini düşürmek için yeniden tasarım ön plana çıkarken, yeni tasarımda her iki firmanın da üretim süreçlerinin dikkate alınması gerekliliği doğmuştur. Çalışmada sonuç olarak, tersine lojistik yaklaşımı ile OEM firmanın maliyetlerinde ortalama %50.10 ve üretici firmanın maliyetlerinde ise %37.08 oranında düşme olmuştur. Elde edilen sonuçlar çevresel faktörler açısından da incelenmiştir. Buna göre, tersine lojistik kullanımı ile, toplam enerji kullanımında %40.02; elektrik kullanımında %36.03 azalma sağlanmıştır. Havaya yayılan karbondioksit ve metan gazlarının oranlarında sırasıyla %54.12, %43.51 azalma sağlanmıştır. Hava kirliliğine neden olan gaz yayılımında ise karbonmonoksit oranı %98.6 azalırken, zehirli madde yayılımında kilogram bazında %61.62 azalma sağlanmıştır [Chan, 2007]. Çalışmanın sonucunda ise böylesi bir tersine lojistik yaklaşımı geliştirebilmek için, yönetimin desteği, bilgi teknolojileri ve bütünleşik ve işbirliği içinde bir yaklaşım gerektiği vurgulanmıştır [Chan, 2007].

[Kara ve ark., 2007]'de, Sidney metropolünde faydalı ömrünü doldurmuş ürünlerin toplanmasıyla ilgili bir tersine lojistik ağı, bir simulasyon modeli yardımıyla incelenmiştir. Simulasyon modeli ile hangi faktörlerin diğerlerinden daha önemli olduğu belirlenmeye çalışılmıştır [Kara ve ark., 2007].

[Sheu, 2008]'de, nükleer güç üretimi ve bunun sonucunda karşılaşılan nükleer atıkların akıbeti problemi ele alınmıştır. Çalışmada, nükleer enerji üretimi ve kullanımından doğan risklerin de altı çizilirken; nükleer enerjinin Dünya'daki tüm enerji kaynakları içindeki payının %17 olduğu ve Dünya'da elektrik ihtiyacının önümüzdeki 20-25 yıllık dönemde iki katına çıkacağı vurgulanarak nükleer enerjinin yadsınamayacağı ortaya konmuştur. Yalnızca Tayvan'da geçen 30 yıl içinde toplam nükleer atığın 9000 tona ulaştığı belirtilmiştir. Bu nükleer atıklar dikkate alınarak, bir tersine lojistik ağı ihtiyacı vurgulanmıştır. Çalışmada bir nükleer santralin işletimi, beş adımdan oluşan bir süreç olarak ifade edilmiştir. Çok amaçlı, doğrusal bir model kurulan çalışmada, bir nükleer santralin net karının enbüyüklenmesi ve tersine lojistik maliyetlerinin enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen model, Tayvan'da kurulu olan ve bu ülkenin toplam güç üretiminin %14.9'unu karşılayan bir nükleer santral için çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, nükleer santralin mevcut yapısındaki değişikliklerle ortalama olarak %37.8'lik bir iyileşme sağlandığı görülmüştür [Sheu, 2008].

[Srivastava, 2008]'de, tersine lojistikte ağ tasarımı problemi önce kavramsal olarak modellenerek böylesi bir sistem için gereklilikler belirlenmiş, sonrasında ise karma tamsayılı bir matematiksel modelleme yapılmıştır. Mevcut tersine lojistik literatürünün derinlemesine incelendiği çalışmada, sistemdeki belirsizliklerle ilgili konuların yeterince incelenmediği, bunun daha çok parametrik analizlerle ve senaryo analizleri ile yapıldığına; olasılıklı yaklaşımların yeterince geliştirilemediğine; çok dönemli modellerin olmadığına dikkat çekilmiştir. Tersine lojistik ağ tasarımı probleminin bir çeşit çok dönemli kaynak tahsis problemi olarak ele alındığı çalışmada, iki aşamalı bir eniyileme süreci seçilmiştir. Birinci aşamada, müşteri odaklı olarak toplama merkezlerinin açılması kararı, sayıları ve yerleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise, yeniden işleme merkezlerinin yerleri ve sayıları ve toplama merkezlerinden buralara olan akışlar periyodik olarak belirlenmiştir. Toplam karın enbüyüklenmesi amaçlanan model için girdi verileri, geri dönen ürünlerin tipleri ve her tip ürün için zamana bağlı geri dönüş miktarları ve maliyet parametreleridir. Girdi verileri, sektördeki 84 şirketle yapılan mülakatlarla elde edilmiştir. Model,

farklı senaryolar oluşturularak denenmiştir ve sonuçlar yorumlanmıştır [Srivastava, 2008].

[Mansour ve Zarei, 2008]'de, Avrupa Birliği'nin kullanım ömrünü doldurmuş araçlarla ilgili yönetmeliğine dikkat çekilmiştir ve işletmeleri her hangi bir ücret söz konusu olmaksızın müşterilerin geri verdikleri ürünleri parçalamak zorunda olmalarının doğurduğu fazladan maliyetlere değinilmiştir. İşletmeler, toplama tesisleri, parçalayıcılardan oluşan ve malzeme akışlarının çok dönemli olarak incelendiği bir problem yapısı için iterativ bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir [Mansour ve Zarei, 2008].

[Figueiredo ve Mayerle, 2008]'de, tersine lojistikte ağ tasarımı problemi incelenmiştir ve bir analitik model sunulmuştur. Bu model için üç aşamalı bir çözüm prosedürü öne sürülen çalışmada, ortaya konulan model, Brezilya'da kullanılmış lastiklerin geri dönüşümü problemi üzerinde incelenmiştir [Figueiredo ve Mayerle, 2008].

[Pishvae ve ark., 2009]'da, ileri yönlü ve tersine lojistiğin beraberce ele alındığı bir problem için öncelikle bir karma tamsayılı matematiksel model öne sürülmüştür. Sonrasında ise bu model senaryo temelli olasılıklı yaklaşım kullanılarak geliştirilmiştir. Tek ürünlü ve tek dönemli ele alınan problemde, toplama ve dağıtma işlemleri tek bir tesis tipinde planlanmıştır [Pishvae ve ark., 2009].

[Wadhwa ve ark., 2009]'da, müşterilerden geri gelen ürünlerin en doğru şekilde değerlendirilmesi amacıyla, bulanık küme teorisi kullanılarak bir yaklaşım geliştirilmiştir. Müşterilerden geri gelen her bir ürün için beş farklı seçenekten birisinin seçimini amaçlayan çalışmada, maliyet, çevresel etki, pazar etkisi, kalite faktör ve hukuki etki çerçevesinde bir değerlendirme yapılmıştır [Wadhwa ve ark., 2009].

[Kim ve ark., 2009]'da, Güney Kore'de tüketici elektroniği geri toplanması problemi, araç rotalama perspektifinden incelenmiştir. Güney Kore'de yıllar

itibariyle farklı tüketici ürünlerinin toplanma miktarlarının da istatistiksel olarak sunulduğu çalışmada, bir matematiksel model geliştirilmiştir ve modelin çözümünde tabu aramadan faydalanılmıştır [Kim ve ark., 2009].

[Easwaran ve Üster, 2010]'da, çok ürünlü, ileri ve tersine lojistiğin beraberce ele alındığı bir problem için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelin çözümünde, Bender ayrıştırma ve Bender kesim algoritmalarından faydalanılmıştır. Yöntemin detaylı olarak anlatıldığı çalışmada, deneysel problemler üzerinde çözüm ve sonuçlar incelenmiştir [Easwaran ve Üster, 2010].

[Sasikumar ve ark., 2010]'da, kamyon tekerleklerinin yeniden üretimi için çok dönemli bir matematiksel model öne sürülmüştür. Problem ve matematiksel modelin detaylı olarak anlatıldığı çalışmada, modelin çalıştırılmasında, kamyon tekerlekleri için bir örnek olay dikkate alınmıştır [Sasikumar ve ark., 2010].

Tersine lojistik literatürü incelendiğinde, ele alınan problemlerin ve bu problemler için geliştirilen çözüm yaklaşımlarının daha çok ele alınan ürün veya sektöre özel olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, literatürde, farklı ürün tipleri için ve farklı geri kazanım seçenekleri için genel bir modele ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada, çok ürünlü bir tersine lojistik ağı, geri dönüşüm, yeniden üretim ve zararlı atıkların işlenmesi seçeneklerinin tümü için incelenmiştir. Bu çalışmada ortaya konulan problem yapısı, tersine lojistik için ağ tasarımı literatüründeki pek çok çalışma alanını birleştirici niteliktedir. Çalışmada ele alınan problemde her bir ürün için tanımlanan farklı parçalama yöntemleri yaklaşımı, literatürde bu konuda yapılmış çalışmalar için bir yenilik olarak görülmektedir. Ayrıca, bu çalışmada tanımlanan problemin özelliklerinden, birden fazla malzeme tipinin, belli malzeme tiplerini geri dönüştürmek üzere uzmanlaşmış geri dönüşüm tesislerinde işlenmesinin, yeniden üretilebilir parçaların belirlenmesi ve bunların yalnızca o parçaya ihtiyaç duyan üretim tesisine gönderilmesinin bu çalışmayı literatürden ayıracağı düşünülmektedir.

3. FARKLI ÜRÜN GERİ KAZANIM SEÇENEKLERİ İÇİN BİR TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIM MODELİ

Etkin bir tersine lojistik sisteminin işlerliğinin birinci aşaması bu sistemin nasıl işleyeceğinin belirlenmesini sağlayan bir ağın tasarımıdır. Bu ağ tasarımı, ortaya konulan problemin yapısı ve bileşenlerine bağlı olarak çeşitlilik gösterebilir. Bu çalışmada, farklı ürün geri kazanım seçeneklerinin aynı anda değerlendirildiği, çok ürünlü bir tersine lojistik ağ tasarım problemi incelenmiştir. Dikkate alınan ürün geri kazanım seçenekleri, geri dönüşüm, yeniden üretim ve zararlı atıkların işlenmesidir. Öncelikle ele alınan problem tanımlanmıştır, problemin bileşenleri ve bu bileşenlere ait özellikler belirlenmiştir. Sonrasında, problemin çözümünde kullanılacak olan doğrusal matematiksel model tanımlanmıştır. Ortaya konulan matematiksel modelin geçerliği ve farklı boyutlardaki problem tiplerinin çözüm sürelerinin analizi açısından bir deneysel çalışma yapılmıştır. Bu deneysel çalışmada dikkate alınan problem tipleri ve bu problemlerin çözülmesiyle elde edilen sonuçlar raporlanmıştır.

3.1. Problemin Tanımlanması

Günümüzde artan nüfus ve değişen tüketim alışkanlıkları neticesinde, üretim hacimleri ve çeşitliliği geçmişte hiç olmadığı seviyelere yükselmiş ve bu da çevresel kirlenmeye ve doğal kaynakların hızla tüketilmesine yol açmıştır. Küresel çapta yapılan anlaşmalar ve ülkelerin kendi koyduğu yasa ve yönetmelikler çerçevesinde, üreticilerin katı atık miktarını azaltıcı çalışmalar yapması zorunlu hale getirilmiştir. Aynı zamanda üretimin temel ihtiyacı olan hammaddenin fiyatı yükselmiştir. Üreticiler, müşterilerden geri topladıkları ürünlerden en iyi şekilde faydalanabilmenin ekonomik yollarını ararken, bir yandan da mevcut yasal düzenlemelerdeki sorumluluklarını yerine getirme adına yeniden üretim, geri dönüşüm gibi ürün geri kazanımı yöntemlerine giderek daha fazla yönelmektedirler.

Bu tez çalışmasında, çok sayıda ürün için yeniden üretim, geri dönüşüm ve tehlikeli atıkların arıtılması seçeneklerinin bir arada değerlendirilebildiği bir ağ tasarım problemi ele alınmıştır. Söz konusu sistemin bileşenleri ürünler, fabrikalar,

müşteriler; toplama tesisleri, geri dönüşüm tesisleri ve tehlikeli atık arıtma tesisleridir. Bu bileşenler ve dikkate alınan özellikleri sırasıyla incelenecektir.

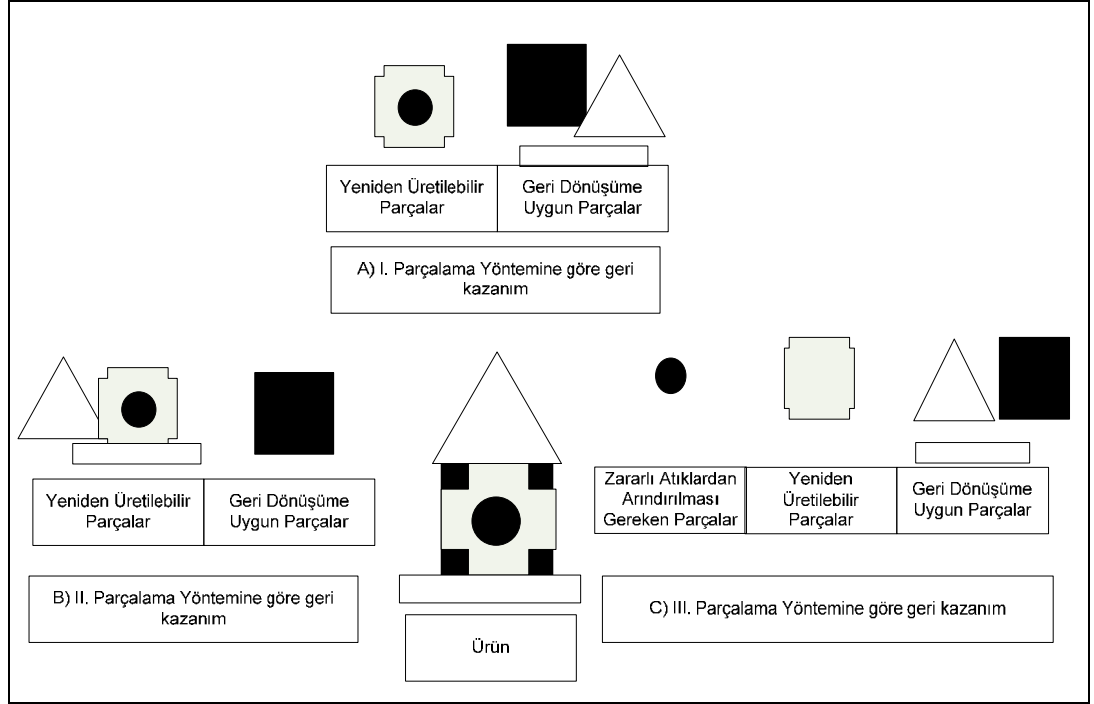
Problemin amacı, sistemin toplam maliyetleri ile sistemden elde edilen kazancın farkının en küçüklenmesidir. Bu maliyetler ve gelirler sırasıyla: (i) müşterilerde geri verilmek üzere bekleyen tüm ürünlerin toplanması sırasında oluşan ulaştırma maliyetleri. (ii) Her bir ürün tipinin belli bir yüzde sistem başarısı yakalamak adına belli kapasite kısıtlamaları altında toplama tesislerinde parçalanması maliyeti. (iii) Yeniden üretilebilir parçaların o parçalara ihtiyaç duyan üretim tesislerine ulaştırılması maliyeti. (iv) Bir veya birden fazla tipte geri dönüştürülebilir malzemenin üçüncü şahıslara ait anlaşmalı geri dönüşüm tesislerine ulaştırılması maliyeti. (v) Zararlı atıkların yine üçüncü şahıslara ait arıtma tesislerine ulaştırılması maliyeti. (vi) Faydasız kısmın katı atık olarak atılması maliyeti. (vii) Geri dönüşümden elde edilen kazanç ve yeniden üretimden sağlanan nesnel fayda. Özetle amaç, sistem maliyetleri ve elde edile gelirler dikkate alınarak maliyet en küçüklemesi yapmaktır. Geri dönüşüm ve tehlikeli atıkların işlenmesi işleri, teknoloji, yatırım ve uzmanlık gerektiren işler olduğu için bu çalışmada işletmenin bu tesisleri kendi açması yerine üçüncü şahıslara ait mevcut tesisleri belli bir maliyet karşılığında ve belli bir toplam kapasite altında kullanması seçeneği dikkate alınmıştır.

3.1.1. Ürünler

Bir tersine lojistik ağının en önemli bileşeni dikkate alınacak olan ürünlerdir çünkü her ürün tasarımından kaynaklanan nedenlerle etkin bir ağın bileşeni olamaz. Ancak, ekonomik olarak bir anlam ifade etmese dahi yasal düzenlemelerin bir gereği olarak bu ürünler dikkate alınmak zorunda olabilir. Bir başka bakış açısından da, bir üründen her zaman aynı geri kazanım sağlanamayabilir. Bu, müşterinin ürünü kullanma şekli, kullanma süresi ve bunun gibi nedenlerle oldukça belirsizdir. Bu belirsizliği gidermek açısından bu çalışmada, ürünlerin geri kazanım oranlarının sabit olduğu varsayımı zorunlu olmuştur. Ayrıca, bir ürün farklı şekillerde parçalanabilir. Her farklı parçalama şekli, harcanan zaman, elde edilen geri kazanılabilir ürün

oranları açısından farklı sonuçlar doğurur. Örneğin bir buzdolabının sadece geri dönüşüm amaçlı olarak parçalanmasında, sadece malzeme tipine göre plastik, metal ve diğer kısımlar ayrıştırılır. Ancak yeniden üretim amaçlı bir parçalamada, ekonomik ömrü yüksek kısımlar, mesela motor, gövde, soğutma ünitesi, dikkatli bir parçalamaya tabi tutulmalıdır. Verilen örnekteki birinci parçalama şekli daha kısa zaman alır ve maliyeti de daha düşük olur. Bu amaçla, bu problemde her ürün için farklı parçalama yöntemleri dikkate alınmıştır. Bununla ilgili bir örnek Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Burada, aynı ürün üç farklı şekilde parçalandığında elde edilen yeniden üretilebilir, geri dönüştürülebilir parçalar ve zararlı atık ihtiva ettiği için arındırılması gereken parçalar gösterilmiştir. Burada gösterilen ürün hayali olsa bile, pek çok gerçek ürün için böylesi bir durum mevcuttur.

Dikkate alınması gereken bir diğer unsur da bir işletmenin birden fazla üretim tesisi varsa yeniden üretilebilir parçaların sadece ihtiyaç olan veya kullanılan üretim tesisine gönderilmesidir. Bu da, modellemeyi zorlaştıracı bir kısıtlamadır. Bir diğer unsur da parçalanan ürünlerin hiçbir şekilde yeniden kullanılamayacak bölümlerinin katı atık olarak atılmasıdır ki bu da işletme için bir maliyettir. Dolayısı ile işletme, katı atık olarak atılacak kısmı mümkün olduğunca küçük tutacak bir ürün tasarım değişikliği ile hem üründen daha büyük oranda bir geri kazanım sağlayabilir ve hem de bu katı atık maliyetlerini azaltabilir.



Şekil 3. 1. Bir ürünün farklı parçalama yöntemleri

Bu çalışmada ele alınan problemde, öncelikle her bir ürün için kaç farklı parçalama yönteminin var olduğu belirlenmiştir. Sonrasında ise her bir ürünün her bir parçalama yöntemine göre parçalanması sonucu elde edilecek olan yeniden üretilebilir parçalar, elde edilecek olan her bir geri dönüştürülebilir malzemenin ağırlığı, ortaya çıkacak olan zararlı atıkların ağırlığı ve tüm faydalı kısım çıkınca ortada kalan katı atık miktarı belirlenmiştir. Problemde, her bir geri dönüşebilir malzeme tipinden elde edilecek gelir ile her bir yeniden üretim parçasından elde edilecek olan gelir belirlenmiştir.

3.1.2. Toplama tesisleri

Bu çalışmada ele alınan problemin en etkin bileşenidir. Müşterilerden geri alınan ürünlerin belli kapasite sınırlamaları altında ürün için daha önceden tanımlanmış olan parçalama yöntemlerine göre parçalandığı ve gerekli dağıtımların yapıldığı tesislerdir. Problemin bir yan amacı da, aday yerlerin hangilerinde bir toplama tesisi açılması kararının alınmasıdır. Diğer yandan, kapasite ihtiyaçları dikkate alınarak problemde birden fazla tipte toplama tesisi tanımlanmıştır. Aday noktalardan birinde

açılacak olan toplama tesisinin hangi boyutta olması gerektiği de ayrı bir karardır. Toplama tesislerinde her bir ürün ve her bir parçalama yöntemi için kullanılacak olan kapasite ve bu işlemin maliyeti, toplama tesisinin belirlenen noktada ve belirlenen boyutta açılmasının maliyeti dikkate alınmıştır.

3.1.3. Geri dönüşüm tesisleri ve zararlı atık işleme tesisleri

Geri dönüşüm tesisleri, kullandıkları teknoloji ve geri dönüştürebildikleri malzeme tiplerine göre ayrışmaktadırlar. Bu amaçla, problemde öncelikle ele alınan geri dönüşüm tesislerinde hangi malzeme tipi veya tiplerinin işlenebildiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, geri dönüşüm işleminin maliyeti ve her bir geri dönüşüm tesisinde kullanılabilir kapasite belirlenmiştir.

Zararlı atık işleme tesislerinde ise yalnızca işleme maliyeti ile toplam kullanılabilir kapasite dikkate alınmıştır.

3.1.4. Müşteriler

İncelenen problemde, sistemde yer alan müşterilerin yerleri ve geri vermek üzere ellerinde bulunan her bir ürün miktarı belli ve biliniyor kabul edilmiştir. Problemde, varsayım olarak, müşterilerin ellerindeki ürünlerin tümüyle geri toplanması zorunluluğu vardır. Ancak, toplanan ürünlerin tümü geri kazanıma tabi tutulmak zorunda değildir. Bunu, sistem maliyetleri ve toplama tesislerinin kapasite kısıtları belirlemektedir. Ancak, bazı yasal düzenlemeler, işletmelerin bazı ürün gruplarını belli oranda geri kazanmaya zorlamaktadır. Uygulamadaki bu unsur, problemde dikkate alınmıştır ve her bir ürün cinsi için belli bir yüzde belirlenerek geri kazanıma tabi tutulacak ürünler için bir alt sınır çizilmiştir. Ancak, işletmelerin geri dönüşüm ve yeniden üretimden elde ettikleri faydanın sistem toplam maliyetini aştığı örneklerde, kapasite kısıtlamalarının izin verdiği ölçütte müşterilerden toplanan ürünlerin olası en büyük yüzde ile parçalanması faydalı olabilir. Böylesi bir durumda, sistem başarısının bir alt sınırı olarak verilen oranlar aşılabılır ve bu değişken, sistemin toplam geri kazanım başarısını da ortaya koyar.

3.1.5. Üretim tesisleri

Üretim tesisleri, ele alınan problemin en pasif bileşenidir. Bu tesisler, toplama tesislerinde elde edilen yeniden üretilebilir parçaların ulaştırıldığı tesislerdir. Ancak, elde edilen yeniden üretilebilir parçalar sadece o parçaya ihtiyaç duyan üretim tesisine gönderilmelidir.

Sistemin yukarıda belirtilen öğeleri ve özellikleri yanında, birim ağırlığı birim mesafe taşıma maliyeti ile birim ağırlığı katı atık olarak atmak maliyeti de sistemin tümünü etkileyen birer değişkendir. Bunun yanında, sistemde yer alan öğelerin yerlerinin bilindiği varsayımı altında tüm tesisler arasındaki mesafeler de bilinmektedir.

Bu tez çalışmasında ele alınan bu problemdeki, farklı parçalama yöntemlerinin dikkate alınması, geri dönüştürülebilir malzeme tiplerinin farklılaştırılması ve geri dönüşüm tesislerinin işleyebildikleri malzeme tipine göre ayrılması, yeniden üretilebilir parçaların yalnızca daha önceden belirlenmiş üretim tesislerine gönderilebilmesi, geri dönüşüm, yeniden üretim ve zararlı atıkların işlenmesi seçeneklerinin beraberce ele alınması özellikleri, literatüre birer katkı olarak düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, burada teorik olarak formülize edilmiş olan bu problemin, pek çok gerçek hayat uygulaması için de kullanılabileceği düşünülmektedir. Uygun parametreler belirlenerek, farklı ağ tipleri için önerilen matematiksel model olduğu gibi kullanılabileceği gibi; problemin tanımından gelen farklı kısıtlamalar veya gereksinimler için uygun karar değişkeni ve kısıt eklemeleri ile pek çok gerçek hayat probleminin çözümünde kullanılabileceği düşünülmektedir. Tanımlanan bu problemin çözümü amacıyla, karma tamsayılı doğrusal bir matematiksel model geliştirilmiştir.

3.2. Matematiksel Model

Bu çalışmada tanımlanan problemin çözülmesi amacıyla geliştirilen karma tamsayılı doğrusal bir matematiksel modelin indisleri, parametreleri, amaç fonksiyonu ve kısıtları aşağıda sunulmuştur.

İndisler:

- i : Üretim tesisleri;
- s : Ürünler;
- d : Parçalama yöntemleri;
- t : Müşteriler;
- l : Aday toplama tesisi konumları;
- j : Toplama tesisi tipleri;
- r : Geri dönüşüm tesisleri;
- h : Zararlı atık işleme tesisleri;
- m : Geri dönüştürülebilir malzeme tipleri;
- g : Yeniden üretilebilir parça tipleri;

Matematiksel modelin parametreleri ve karar değişkenleri tanımlanırken hangi indise bağlı olduklarını veya akışın yönünü göstermek açısından üst simgeler kullanılmıştır. Bunlar:

- K : Müşteriler,
- C : Toplama tesisleri;
- P : Üretim tesisleri;
- U : Geri dönüşüm tesisleri;
- W : Zararlı atık işleme tesisleri.

Parametreler:

$$K_{s,d} = \begin{cases} 1 & \text{Eğer } s \text{ ürünü için bir } d \text{ parçalama yöntemi mevcut ise} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases};$$

$$\gamma_{s,d,g}^1 = \begin{cases} 1 & \text{Eğer } d \text{ parçalama yöntemine göre parçalanmış } s \text{ ürününden yeniden} \\ & \text{üretilebilir } g \text{ parçası elde edilebiliyorsa} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases};$$

$\gamma_{s,d,m}^2$: d parçalama yöntemine göre parçalanmış s ürünündeki m geri dönüşüm malzemesinin ağırlığı;

$\gamma_{s,d}^3$: d parçalama yöntemine göre parçalanmış s ürünündeki zararlı atığın ağırlığı;

$\gamma_{s,d}^4$: d parçalama yöntemine göre parçalanmış s ürünündeki katı atık ağırlığı;

Q_s : s ürünün ağırlığı;

Q_g^l : Yeniden üretilebilir g parçasının ağırlığı;

B_s : s ürününün beklenen geri toplama başarısı (yüzde);

$$E_{i,g} = \begin{cases} 1 & \text{Eğer } i \text{ üretim tesisinde } g \text{ yeniden üretilebilir parçası kullanılıyorsa} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases};$$

$R_{t,s}$: t müşterisinde geri verilmek üzere bekleyen s ürünü miktarı;

$O_{l,j}$: l noktasında j tipinde bir toplama tesisi açmanın sabit maliyeti;

C_j^l : j tipindeki toplama tesislerinin toplam kapasitesi;

$P_{l,s,d}$: d parçalama yöntemine göre s ürününü l toplama tesisinde işlemenin maliyeti ;

$\delta_{l,s,d}$: d parçalama yöntemine göre s ürününün l toplama tesisinde işlenirken kullanılan kapasite;

$$N_{r,m} = \begin{cases} 1 & \text{Eğer } m \text{ malzeme tipi } r \text{ geri dönüşüm tesisinde işlenebilirse} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases};$$

C_r^u : r geri dönüşüm tesisine toplam nakledilebilecek geri dönüştürülebilir malzeme miktarı;

σ_m^u : Birim ağırlıkta m malzemesinin geri dönüşüm tesisine satılmasından sağlanan gelir;

σ_g^i : Birim g parçasının yeniden üretilmesi nedeniyle elde edilen gelir;

W_h : Birim zararlı atığın h 'da işleme maliyeti;

C_h^w : h zararlı atık işleme tesisinde kullanılabilir toplam kapasite;

F : Birim ağırlığın birim mesafeye taşınması maliyeti;

D : Birim ağırlık için katı atık maliyeti;

$L_{t,l}^{KC}$: Her bir müşteri ile her bir toplama tesisi arasındaki mesafeler;

$L_{l,i}^{CP}$: Her bir toplama tesisi ile her bir üretim tesisi arasındaki mesafe;

$L_{l,r}^{CU}$: Her bir toplama tesisi ile her bir geri dönüşüm tesisi arasındaki mesafe;

$L_{l,h}^{CW}$: Her bir toplama tesisi ile her bir zararlı atık arıtma tesisi arasındaki mesafe;

M : Büyük bir sayı

Karar değişkenleri:

$$Y_{l,j}^C = \begin{cases} 1 & \text{Eğer } l \text{ aday noktasında } j \text{ tipinde bir toplama tesisi açılmışsa} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases};$$

$X_{t,l,s}^{KC}$: t müşterisinden l toplama tesisine olan s ürünü akışı;

$X_{l,i,g}^{CP}$: l toplama tesisinden i üretim tesisine olan yeniden üretilebilir g parçası akışı;

$X_{l,r,m}^{CU}$: l toplama tesisinden r geri dönüşüm tesisine olan m malzeme akışı;

$X_{l,h}^{CW}$: l toplama tesisinden h zararlı atık işleme tesisine olan malzeme akışı;

$Z_{l,s,d}$: l 'de toplanmış, ayrıştırılmış ve d parçalama yöntemine göre parçalanmış s ürünü sayısı;

$A_{l,s}$: Kapasite kısıtlamaları nedeni ile l toplama tesisinde tümüyle atılan s ürünü sayısı;

Matematiksel Model:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_l \sum_j Y_{l,j}^C * O_{l,j} + D * \left(\sum_l \sum_s A_{l,s} * Q_s \right) + D * \sum_s \sum_d \gamma_{s,d}^4 * \sum_l Z_{l,s,d} + \\ & \sum_l \sum_s \sum_d Z_{l,s,d} * P_{l,s,d} + \sum_h W_h * \sum_l X_{l,h}^{CW} + F * \sum_t \sum_l \sum_s Q_s * L_{t,l}^{KC} * X_{t,l,s}^{KC} \\ & + F * \sum_l \sum_i L_{l,i}^{CP} * \sum_g QI_g * X_{l,i,g}^{CP} + F * \sum_l \sum_r \sum_m L_{l,r}^{CU} * X_{l,r,m}^{CU} \\ & + F * \sum_l \sum_h L_{l,h}^{CW} * X_{l,h}^{CW} - \sum_m \sigma_m^u * \sum_l \sum_r X_{l,r,m}^{CU} - \sum_g \sigma_g^i * \sum_l \sum_i X_{l,i,g}^{CP} \end{aligned} \quad (3.1)$$

s.t.

$$\sum_j Y_{l,j}^C \leq 1 \quad \forall l \quad (3.2)$$

$$\sum_l \sum_d Z_{l,s,d} \geq B_s * \sum_t R_{t,s} \quad \forall s \quad (3.3)$$

$$\sum_l X_{t,l,s}^{KC} = R_{t,s} \quad \forall t, s \quad (3.4)$$

$$\sum_t \sum_s X_{t,l,s}^{KC} \leq \sum_j Y_{l,j}^C * M \quad \forall l \quad (3.5)$$

$$\sum_t X_{t,l,s}^{KC} = A_{l,s} + \sum_d Z_{l,s,d} \quad \forall l, s \quad (3.6)$$

$$\sum_l Z_{l,s,d} \leq K_{s,d} * M \quad \forall s, d \quad (3.7)$$

$$\sum_l X_{lig}^{CP} \leq E_{i,g} * M \quad \forall i, g \quad (3.8)$$

$$\sum_i X_{lig}^{CP} = \sum_s \sum_d \gamma_{s,d,g}^1 * Z_{l,s,d} \quad \forall l, g \quad (3.9)$$

$$\sum_l X_{lrm}^{CU} \leq N_{r,m} * M \quad \forall r, m \quad (3.10)$$

$$\sum_r X_{lrm}^{CU} = \sum_s \sum_d \gamma_{s,d,m}^2 * Z_{l,s,d} \quad \forall l, m \quad (3.11)$$

$$\sum_h X_{lh}^{CW} = \sum_s \sum_d (\gamma_{s,d}^3 * Z_{l,s,d}) \quad \forall l \quad (3.12)$$

$$\sum_l X_{lh}^{CW} \leq C_h^w \quad \forall h \quad (3.13)$$

$$\sum_s \sum_d Z_{l,s,d} * \delta_{l,s,d} \leq \sum_j Y_{l,j}^C * C_j^l \quad \forall l \quad (3.14)$$

$$\sum_l \sum_m X_{lrm}^{CU} \leq C_r^u \quad \forall r \quad (3.15)$$

$$X_{l,i,g}^{CP}, X_{l,r,m}^{CU}, X_{l,h}^{CW} \geq 0 \quad (3.16)$$

$$Y_{l,j}^C \in \{0, 1\}$$

$$Z_{l,s,d}, A_{l,s}, X_{t,l,s}^{KC} \in I^+$$

Matematiksel modelin amaç fonksiyonu, sistem maliyetleri ve elde edilen gelirlerden oluşmaktadır. $\sum_l \sum_j Y_{l,j}^C * O_{l,j}$, toplama tesislerinin açılmasından kaynaklanan sabit maliyetleri; $D * \left(\sum_l \sum_s A_{l,s} * Q_s \right) + D * \sum_s \sum_d \gamma_{s,d}^4 * \sum_l Z_{l,s,d}$ sırasıyla toplama tesislerinde işlenemediği için atılan parçalar ile parçalama sonrası kullanılamayacak bölümlerin katı atık maliyetlerini; $\sum_l \sum_s \sum_d Z_{l,s,d} * P_{l,s,d} + \sum_h W_h * \sum_l X_{l,h}^{CW}$ sırasıyla parçalama maliyetlerini ve zararlı atıkların işlenmesi maliyetlerini, $F * \sum_t \sum_l \sum_s Q_s * L_{t,l}^{KC} * X_{t,l,s}^{KC}$ müşterilerden toplama tesislerine ulaştırma maliyetlerini, $F * \sum_l \sum_i L_{l,i}^{CP} * \sum_g Q_g^I * X_{l,i,g}^{CP}$ toplama tesislerinden üretim tesislerine ulaştırma maliyetlerini, $F * \sum_l \sum_r \sum_m L_{l,r}^{CU} * X_{l,r,m}^{CU}$ toplama tesislerinden geri dönüşüm tesislerine ulaştırma maliyetlerini, $F * \sum_l \sum_h L_{l,h}^{CW} * X_{l,h}^{CW}$ toplama tesislerinden zararlı atık işleme tesislerine olan ulaştırma maliyetlerini göstermektedir. Sistemin iki gelir kalemi olan geri dönüştürülmek üzere verilen malzemelerden elde edilen geliri $\sum_m \sigma_m^u * \sum_l \sum_r X_{l,r,m}^{CU}$; parçaların yeniden üretilmesi sonucu elde edilen geliri ise $\sum_g \sigma_g^i * \sum_l \sum_i X_{l,i,g}^{CP}$ göstermektedir.

Matematiksel modelin kısıtları sırasıyla incelenecek olursa: (Eş. 3.2) ile bir aday noktada yalnızca tek bir tipte toplama tesisi açılması sağlanmıştır. (Eş. 3.3) ile her bir ürün tipi için en az belirlenen alt sınır kadarının toplama tesislerinde işlenmesi sağlanmıştır. (Eş. 3.4) ile müşterilerin ellerindeki tüm ürünlerin toplanması sağlanmıştır. (Eş. 3.5) ile müşterilerden ürünlerin yalnızca o toplama tesisi açılmışsa ulaştırılması garanti altına alınmıştır. (Eş. 3.6) ile müşterilerden alınan ve bir toplama tesisine teslim edilen ürünlerin ya tümüyle atılacağı ya da bir parçalama yöntemine göre parçalanacağı belirtilmiştir. (Eş. 3.7) ile bir toplama tesisinde bir ürünün yalnızca o ürün için belirlenen parçalama yöntemlerinden birine göre parçalanabileceği belirlenmiştir. (Eş. 3.8) ile parçalanmış bir üründen elde edilen her

bir yeniden üretilebilir parçanın yalnızca daha önceden belirlendiği şekilde bu parçayı kabul edecek bir üretim tesisine gönderilmesi sağlanmıştır. (Eş. 3.9) ile bir toplama tesisinden üretim tesislerine gönderilebilecek yeniden üretilebilir parçaların akışı belirlenmiştir. (Eş. 3.10) ile bir geri dönüşüm tesisine yalnızca orada geri dönüştürülebilecek malzeme tiplerinin gönderilebileceği doğrulanmaktadır. (Eş. 3.11) ile bir toplama tesisinden bir geri dönüşüm tesisine gönderilecek her bir malzeme tipinin o toplama tesisinde parçalanan ürünlerden elde edilen malzemeler olması sağlanmıştır. (Eş. 3.12) ile, toplama tesislerinden zararlı atık işleme tesislerine olan akış kontrol edilmektedir. (Eş. 3.13), (Eş. 3.14) ve (Eş. 3.15), sırasıyla zararlı atık işleme tesisleri, toplama tesisleri ve geri dönüşüm tesisleri için kapasite kısıtlarıdır. (Eş. 3.16) ile, karar değişkenlerinin matematiksel tipleri tanımlanmıştır.

Bu haliyle, tanıtılan modelin en büyük avantajı, karar vericiye sunduğu esnekliktir. Bu model kullanılarak, sadece bir geri dönüşüm ağı veya sadece bir yeniden üretim ağı tasarlanabileceği gibi uygun parametre girişleri ile geri dönüşüm, yeniden üretim ve zararlı atıkların arındırılması gibi tersine lojistik literatüründe çoğunlukla tek tek ele alınmış olan geri kazanım seçeneklerinin tümü veya ikili kombinasyonları çözülebilmektedir.

Matematiksel modelin karar değişkenleri incelendiğinde iki farklı tipte karar değişkeni olduğu görülmektedir, bunlar; toplama tesislerinin açılma kararlarından oluşan 0-1 karar değişkenleri ve açılma kararlarının ardından tesisler arası taşımaları gösteren tamsayı ve sürekli değişkenler. Başka bir deyişle, problemde toplama tesislerinin açılma kararı alındıktan sonra geriye kalan problem, aktarmalı ulaştırma problemidir. Matematiksel modelin çözümünü zorlaştıran karar değişkenleri de yine toplama tesislerinin açılma kararlarına bağlı olan 0-1 karar değişkenleridir. Bu karar değişkenlerinin sayısı, aday toplama tesisi sayısı ve toplam tesisi tipleri sayısının bir fonksiyonudur. Bu tez çalışmasında ele alınan problemin çözümü için önerilen matematiksel modelin farklı problem büyüklükleri ve farklı parametreler altında çözüm süresinin ve elde edilen sonuçların analizi amacıyla bir deneysel çalışma yapılmıştır.

3.3. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada önerilen modelin çözüm performansının belirlenmesi ve karar vericiye sunduğu esnekliğin gösterilmesi açısından çeşitli test problemleri oluşturularak GAMS yazılımında çözülmüştür. Bu amaçla öncelikle bir deneysel çalışma planı belirlenmiştir. Öncelikle, sadece geri dönüşüm ağı (G), geri dönüşüm ve yeniden üretimin beraberce ele alındığı ağ (G_Y) ve son olarak da geri dönüşüm, yeniden üretim ve zararlı atıkların işlenmesi seçeneklerinin beraberce ele alındığı ağ (G_Y_Z) olmak üzere üç farklı ağ tasarım tipi dikkate alınmıştır. Her bir ağ tasarım tipi için üç farklı ürün sayısı seviyesi belirlenmiştir. Bunlar, 2, 3 ve 5'tir. Her bir ürün sayısı seviyesi için, iki farklı parçalama planı belirlenmiştir. Birincisinde sadece bir plan olduğundaki durum incelenirken, ikincisinde her bir ürün için iki farklı parçalama planı belirlenmiştir. Beş farklı müşteri sayısı seviyesi belirlenmiştir. Bunlar, 25, 50, 100, 250 ve 500'dür. Her bir müşteri sayısı seviyesi için üç farklı aday toplama tesisi sayısı belirlenmiştir. Belirlenen bu aday toplama tesisi sayıları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Ayrıca, belirlenen her bir problem grubundan beş farklı örnek oluşturulmuştur. Toplamda, 1350 adet örnek problem elde edilmiştir.

Çizelge 3. 1. Müşteri sayılarına göre belirlenen aday toplama tesisi sayıları

Müşteri Sayısı	Aday Toplama Tesis Sayısı
25	8
	10
	15
50	10
	15
	20
100	20
	35
	45
250	45
	65
	90
500	80
	120
	180

Problemler üretilirken, modelde kullanılan parametrelerin belirlenmesinde [Amiri, 2006]'da kullanılan sistematiğten faydalanılmıştır. Problemlerin oluşturulmasında ve parametrelerin belirlenmesinde kullanılan yöntem adım adım belirtilmiştir. Deneysel çalışmada, problem parametrelerini belirlemede kullanılan yöntemler Ek-1'de gösterilmiştir.

Adım 1. Problemlerde, 2, 3 ve 5 olmak üzere üç farklı ürün sayısı seviyesi belirlenmiştir. Diğer parametrelerden bağımsız olmak üzere, aynı ürün sayısı ve aynı parçalama yöntemi sayısına sahip olan problemlerde aynı ürün yapılarının kullanılmasıyla, problemlerin birbirleriyle kıyaslanmasının kolaylaşacağı düşüncesiyle, 18 farklı ürün parçalama planları belirlenmiştir. Burada bahsedilen ürün parçalama planları, ürünler parçalandığında elde edilecek olan geri kazanılabilir parçalar ve malzemelerdir. Bunlardan ilk dokuzu parçalama yöntemi bir iken, kalanı ise parçalama yöntemi iki iken kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Her bir dokuzlu grup ise G, G_Y ve G_Y_Z ağ tipleri için sırasıyla iki ürünlü, üç ürünlü ve beş ürünlü parçalama planlarını içermektedir. Parçalama yöntemi sayısı bir olduğunda, belirlenen bu ürün parçalama planları ve geri kazanım miktarları Çizelge 3.2'de, parçalama yöntemi sayısı iki olduğunda ise belirlenen değerler Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 2. Parçalama yöntemi sayısı bir olduğunda parçalama planları

Ağ Tipi	Ürün Sayısı	Ürün	Ağırlık (Q)	Tiplerine Göre Geri dönüştürülebilir malzeme ağırlığı			Parçalama Sonucu Ortaya Çıkan Yeniden üretilebilir parçalar			Zararlı atık ağırlığı	Doğrudan atık ağırlığı
				m=1	m=2	m=3	g=1	g=2	g=3		
G	2	1	120	21	9,2	18,1	0	0	0	0	71,7
		2	70	5,9	15,3	13,1	0	0	0	0	35,8
	3	1	60	12,8	7,2	9,9	0	0	0	0	30,1
		2	40	6,5	3,6	5,2	0	0	0	0	24,7
		3	70	4,7	7,8	8,1	0	0	0	0	49,3
	5	1	90	6	18,8	0	0	0	0	0	65,2
		2	110	21,3	4,3	16,8	0	0	0	0	67,6
		3	40	3,5	0	5,4	0	0	0	0	31,1

Çizelge 3. 2. (Devam) Parçalama yöntemi sayısı bir olduğunda parçalama planları

Ağ Tipi	Ürün Sayısı	Ürün	Ağırlık (Q)	Tiplerine Göre Geri dönüştürülebilir malzeme ağırlığı			Parçalama Sonucu Ortaya Çıkan Yeniden üretilebilir parçalar			Zararlı atık ağırlığı	Doğrudan atık ağırlığı
				m=1	m=2	m=3	g=1	g=2	g=3		
G	5	4	70	17,8	0	29,4	0	0	0	0	22,8
		5	120	17,8	3,8	18,9	0	0	0	0	79,5
G_Y	2	1	40	1,4	3,8	5,4	0	1	0	0	28,4
		2	60	0	7,1	22,5	0	1	1	0	17,9
	3	1	110	6,2	11,8	8,3	1	1	0	0	54,7
		2	40	5,4	11,2	3,7	0	0	1	0	12,7
		3	90	17,9	4,1	15	1	1	0	0	23,8
	5	1	60	0	8	8	1	1	1	0	21,5
		2	90	9,8	3,7	8,6	0	1	0	0	57,2
		3	40	0	12,3	9,2	1	1	0	0	3,2
		4	150	19	31,6	21,8	0	1	0	0	66,8
		5	120	54,5	0	0	0	1	0	0	54,7
G_Y_Z	2	1	90	0	17,5	5,9	1	0	1	2,6	46,6
		2	60	0	17,6	22,3	1	0	1	0,9	1,8
	3	1	110	6,1	7,5	15,8	1	1	1	3,7	44,2
		2	40	6,6	5,2	6,2	1	0	0	1,1	8,4
		3	90	33	10,6	12,4	1	0	1	2,5	1,5
	5	1	90	23,7	0	31,4	1	0	1	3,6	25,6
		2	150	57,1	19,5	26	1	1	1	4	33,2
		3	140	5,7	12,3	12,3	0	1	0	4	101,1
		4	90	14,9	25,8	15,5	1	0	1	3,3	24,9
		5	140	23,4	35	29,2	0	1	0	1,8	46,1

Çizelge 3. 3. Parçalama yöntemi sayısı iki olduğunda parçalama planları

Ağ Tipi	Ürün Sayısı	Ürün	Ağırlık (Q)	Parçalama Yöntemi	Tiplerine Göre Geri dönüştürülebilir malzeme ağırlığı			Parçalama Sonucu Ortaya Çıkan Yeniden üretilebilir parçalar			Zararlı atık ağırlığı	Doğrudan atık ağırlığı
					m=1	m=2	m=3	g=1	g=2	g=3		
G	2	1	90	1	23,5	24,4	0	0	0	0	0	42,1
				2	6,4	14,8	12,5	0	0	0	0	56,2
		2	50	1	4,8	10,4	2,8	0	0	0	0	32
				2	11,9	0	18,5	0	0	0	0	19,6
	3	1	30	1	4,7	2,4	0	0	0	0	0	22,9
				2	1,8	3,3	2,3	0	0	0	0	22,6
		2	120	1	8,3	9	20,6	0	0	0	0	82,1
				2	22,7	12,8	29,4	0	0	0	0	55,1
		3	140	1	0	32,7	23,8	0	0	0	0	83,5
				2	7,5	8,8	13,2	0	0	0	0	110,5
	5	1	60	1	6,6	7,4	3	0	0	0	0	43,1
				2	11,5	12	6	0	0	0	0	30,5
		2	30	1	2,5	2,2	2,6	0	0	0	0	22,7
				2	8	5	6,7	0	0	0	0	10,3
		3	140	1	23,5	16,6	0	0	0	0	0	99,9
				2	21,4	45,9	0	0	0	0	0	72,7
		4	40	1	3,6	3,2	5,8	0	0	0	0	27,4
				2	9	7	3,9	0	0	0	0	20,1
		5	120	1	32,9	18,7	32	0	0	0	0	36,4
				2	22,3	15,5	6,4	0	0	0	0	75,8
G_Y	2	1	80	1	37	0	7,2	0	1	1	0	21,3
				2	7,6	28,3	0	1	0	0	0	36,7
		2	60	1	0	10,5	17,6	0	1	1	0	17,4
				2	11,1	6,4	0	1	1	0	0	24,7
	3	1	60	1	4,4	15	14,8	0	1	1	0	9,8
				2	13,2	0	16,1	0	0	1	0	26,2
		2	100	1	16,4	23,7	0	1	1	0	0	35,4
				2	31,6	10,4	16,8	1	0	0	0	28,1
		3	40	1	2,7	2,7	7,7	1	0	0	0	13,9
				2	5,9	2,6	9,4	0	1	1	0	6,1
	5	1	130	1	0	39,3	43,6	0	1	1	0	11,2
				2	23,1	0	14,2	1	0	0	0	89,8
		2	40	1	7	6,6	4,5	1	0	1	0	9,3
				2	5,4	8,4	9,4	1	0	0	0	13,9
		3	90	1	33,3	12,5	10,3	0	0	1	0	24,3
				2	12,6	0	47,9	1	0	1	0	17
		4	140	1	19,2	17,6	0	0	1	1	0	67,3
				2	25	20,5	10	1	1	0	0	55,3
		5	60	1	17,8	12,1	8	1	0	1	0	9,6
				2	17,9	0	0	0	1	1	0	6,2

Çizelge 3. 3. (Devam) Parçalama yöntemi sayısı iki olduğunda parçalama planları

Ağ Tipi	Ürün Sayısı	Ürün	Ağırlık (Q)	Parçalama Yöntemi	Tiplerine Göre Geri dönüştürülebilir malzeme ağırlığı			Parçalama Sonucu Ortaya Çıkan Yeniden üretilebilir parçalar			Zararlı atık ağırlığı	Doğrudan atık ağırlığı
					m=1	m=2	m=3	g=1	g=2	g=3		
G_Y_Z	2	1	50	1	11,8	0	10,6	1	1	1	0,6	17,6
				2	0	15,7	12,6	0	0	1	1,4	19,2
		2	130	1	36,3	28,1	8,3	1	1	0	4,7	44,3
				2	10,4	33,9	27,3	0	1	1	1,7	51,4
	3	1	50	1	0	0	19	1	0	1	1,5	24,6
				2	8,1	7,7	18,5	0	1	1	0,9	10,5
		2	30	1	4,4	0	5,1	1	0	1	0,4	15,2
				2	4,3	4,6	7,8	0	1	0	0,7	10,4
		3	90	1	17,9	10,6	13,1	0	1	0	4,3	41,9
				2	7,6	6,7	5,6	1	1	1	4	59
		5	120	1	0	39,4	40,9	1	1	1	5,1	1,4
				2	16,8	35,9	17,6	1	0	1	3,9	24,9
		2	80	1	0	0	17,8	1	1	0	0,9	31,1
				2	20,2	0	19,2	0	1	1	1,6	23,7
		3	50	1	0	6,4	14,6	0	1	1	2	11,7
				2	5,9	0	13,3	0	1	1	0,9	14,6
		4	120	1	18,2	18,1	11,2	1	1	1	3,3	35,9
				2	14,7	9,3	3,4	0	1	1	3,7	73,6
		5	110	1	7,8	6	17,7	1	0	1	4,8	52,8
				2	27,9	0	26,1	1	1	1	2,6	20,2

Adım 2. Her bir örnek problem için müşterilerin, toplama tesislerinin, geri dönüşüm tesislerinin, zararlı atık işleme tesislerinin ve üretim tesislerinin yerleri 100*100'lük bir alan içinde rasgele belirlenmiştir. Belirlenen bu koordinatlara göre tesisler arasındaki öklid uzaklıklar hesaplanmıştır.

Adım 3. Her bir müşterinin her bir üründen geri vereceği ürün sayısı uniform dağılıma uygun rasgele bir değişken olarak [0, 50] aralığında belirlenmiştir. Sistemde toplam geri dönen ürün sayısı kaydedilmiştir.

Adım 4. Eş. 3.18 kullanılarak her bir toplama tesisi için ve toplama tesislerinin her bir tipi için kapasiteler belirlenmiştir. Burada kullanılan yöntem [Amiri, 2006]'daki yönteme benzemektedir ancak $\delta_{l,s,d}$ (d parçalama yöntemine göre s ürününün l toplama tesisinde işlenirken kullanılan kapasite) parametresinden dolayı [Amiri, 2006]'daki sistematik güncellenmiştir.

l = Toplama tesisi sayısı,

top_g = toplam geri dönen ürün sayısı,

C_j^l : j tipindeki toplama tesislerinin toplam kapasitesi

$$cap = \frac{1,5 * top_g}{l}$$

$$C_1^l = 0,5 * cap,$$

$$C_2^l = 0,75 * cap,$$

$$C_3^l = cap,$$

$$C_4^l = 1,25 * cap,$$

$$C_5^l = 1,5 * cap.$$

(3.18)

Adım 5: Toplama tesislerinin açılma maliyetleri, [Amiri, 2006]'dakine benzer bir metotla diğer maliyet parametreleri göz önünde tutularak Eş. 3.19'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$O_{l,j}$: l noktasında j tipinde bir toplama tesisi açmanın sabit maliyeti

olsun,

$O_{l,3}$ 'ün merkez noktası olan $[50,50]$ 'ye uzaklığı d olsun;

$O_{l,3}$ 'ün açılma maliyeti $500*d$;

$$O_{l,1} = 0,6 * (500 * d)$$

$$O_{l,2} = 0,85 * (500 * d)$$

$$O_{l,4} = 1,15 * (500 * d)$$

$$O_{l,5} = 1,35 * (500 * d)$$

(3.19)

Adım 6: Sistemin diğer parametreleri, Çizelge 3.4'de gösterildiği gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3. 4. Sistemin diğer parametrelerinin belirlenmesi

$P_{l,s,d}$: d parçalama yöntemine göre s ürününü l toplama tesisinde işlemenin maliyeti ; Unif [0,2 , 0,8]
$\delta_{l,s,d}$: d parçalama yöntemine göre s ürününün l toplama tesisinde işlenirken kullanılan kapasite; Unif [1 , 5]
$N_{r,m} = \begin{cases} 1 & \text{Eğer m malzeme tipi r geri dönüşüm tesisinde işlenebilirse} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$ $N_{r,m} = \begin{cases} 1 & \%60 \text{ olasılıkla} \\ 0 & \%40 \text{ olasılıkla} \end{cases}$
C_r^u : r geri dönüşüm tesisine toplam nakledilebilecek geri dönüştürülebilir malzeme miktarı; top_g = Sistemde toplam geri dönen ürün sayısı; r : Geri dönüşüm tesisleri; $C_r^u = \frac{top_g * 1,15}{r}$
W_h : Birim h zararlı atığının işlenme maliyeti; Unif [0,4 , 0,8]
C_h^w : h zararlı atık işleme tesisinde kullanılabilir toplam kapasite; top_g = Sistemde toplam geri dönen ürün sayısı; h : Zararlı atık işleme tesisleri sayısı; $C_h^w = \frac{top_g * 1,15}{h}$
F : Birim ağırlığın birim mesafeye taşınması maliyeti; $F = 0,008$
D : Birim ağırlık için katı atık maliyeti; $D = 1,2$
j : toplama tesisi tipleri; $j=5$

Deneyisel problemlerin üretilmesinde, iki farklı parçalama sayısı, üç farklı ağ tipi, üç farklı ürün sayısı, beş farklı müşteri sayısı, üç farklı toplama tesisi sayısı ve her bir problem grubunda beş adet örnek problem üretilmiştir. Üretilen toplam problem sayısı Eşitlik 3.20’de gösterildiği gibi 1350’dir.

$$\text{Problem Sayısı} = 2*3*3*5*3*5=1350$$

3.20

Deneysel problemlerin rastlantısal olarak elde edilebilmesi için Microsoft Visual Basic yazılımı kullanılarak bir program hazırlanmıştır ve tüm problemler aynı sistematikte tek aşamada üretilmiştir. Bu yöntemle elde edilen problemler, GAMS 22.5 yazılımı ve CPLEX çözücüsü kullanılarak, 2 GB ram kullanan ve 1.80 Ghz hızında çift işlemcili bilgisayarlarda, 7200 saniyelik işlemci zamanı üst limiti koyularak çözülmüştür. Bu süre içinde en iyi sonucu bulunamayan örnekler için o ana kadar bulunan en iyi çözüm kaydedilmiştir. 25 müşterili ve 8 aday toplama tesisi için örnek bir problemin karar değişkenleri ve model gösterimi için GAMS 22.5 yazılımı ile kodlanmış hali Ek-2’de sunulmuştur.

Problemlerin çözümüyle elde edilen sonuçların analizinde, çözüm süreleri dikkate alınmıştır. Tüm problemlerin 449 tanesi, çözüm için tanınan üst sınır olan 7200 saniyede çözülememiştir. Çözülemeyen bu problemlerin bir tanesi 100 müşterili, 188 tanesi 250 müşterili ve kalan 260 tanesi de 500 müşterili örneklerdir. Deneysel problemlerin çözüm süreleri incelenirken öncelikle farklı parametrelere göre ayrı analizler yapılmıştır. Sonrasında ise tüm parametrelerin çözüm süresi üzerindeki etkisi birlikte ele alınmıştır.

Oluşturulan deneysel problemlerde, sadece müşteri sayısı seviyesi dikkate alındığında, her bir örnek grubunda 270 adet problem vardır. Müşteri sayısına göre, 7200 saniyenin altında bir sürede en iyi çözümün bulunabildiği problemlerin ortalama çözüm süreleri ile o örnek grubundaki en büyük ve en küçük çözüm süreleri Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 5. Müşteri sayısına göre çözüm süreleri

Müşteri Sayısı	Süre İçinde Sonuç Bulunan Örnek Sayısı	Ortalama Çözüm Süresi (s.)	En küçük Çözüm Süresi (s.)	En büyük Çözüm Süresi (s.)
25	270	19,11	0,05	813,78
50	270	187,02	0,17	5463,05
100	269	624,29	0,83	6023,03

Çizelge 3. 5. (Devam) Müşteri sayısına göre çözüm süreleri

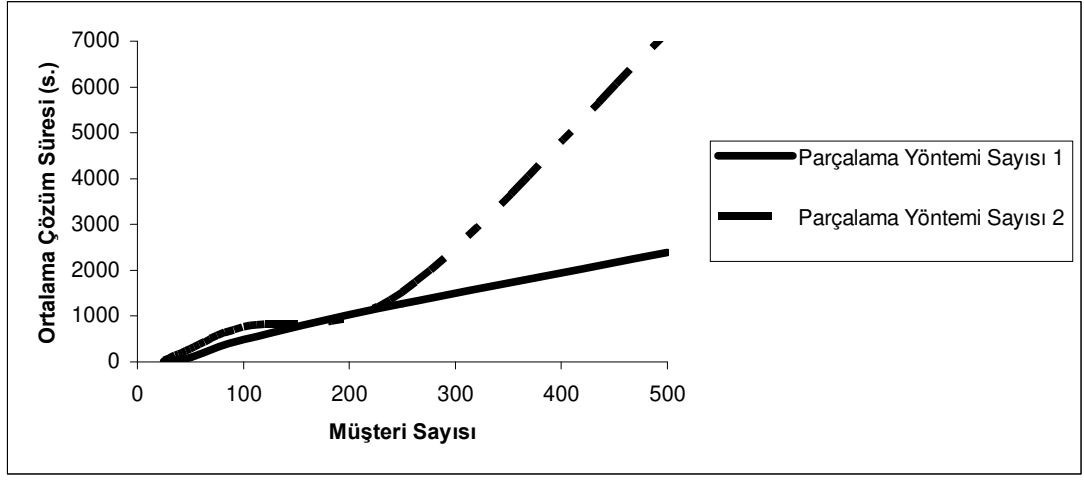
Müşteri Sayısı	Süre İçinde Sonuç Bulunan Örnek Sayısı	Ortalama Çözüm Süresi (s.)	En küçük Çözüm Süresi (s.)	En büyük Çözüm Süresi (s.)
250	82	1356,01	28,61	6046,38
500	10	2393,02	293,91	5225,11

Çizelge 3.5'deki veriler incelendiğinde, müşteri sayısının artışıyla hem ortalama çözüm sürelerinin arttığı ve hem de 7200 saniyenin altında en iyi çözümün bulunduğu örnek sayısının azaldığı görülmüştür. Çizelge 3.6'da ise müşteri sayıları ile parçalama yöntemi sayıları değişkenleri beraberce ele alınmıştır. Burada, her bir örnek grubunda toplam 135 problem vardır. Çizelge 3.6'da, müşteri sayıları artarken öncelikle parçalama yöntemi sayısı 1 olduğunda, sonrasında ise parçalama yöntemi sayısı 2 olduğunda çözülen problemlerin kaç tanesinin 7200 saniye altında çözülebildiği, çözülen problemler için ortalama çözüm süreleri ile her bir problem grubu için en küçük ve en büyük çözüm süreleri analiz edilmiştir. Burada, parçalama yöntemi sayısı 2 olduğunda ve müşteri sayısı 500 iken, hiçbir örnek 7200 saniyenin altında çözülememiştir. Bu nedenle çizelgede var olmayan değerler için “*” kullanılmıştır.

Çizelge 3. 6. Müşteri sayısı ve parçalama yöntemi sayısı beraberce incelendiğinde çözüm süreleri

Müşteri Sayısı	Parçalama Yöntemi Sayısı	Süre İçinde Sonuç Bulunan Örnek Sayısı	Ortalama Çözüm Süresi (s.)	En küçük Çözüm Süresi (s.)	En büyük Çözüm Süresi (s.)
25	1	135	14,57	0,05	755,16
	2	135	23,65	0,09	813,78
50	1	135	101,01	0,20	2876,75
	2	135	273,03	0,17	5463,05
100	1	135	485,64	0,83	5092,19
	2	134	763,98	1,44	6023,63
250	1	55	1273,41	44,39	6046,38
	2	27	1524,26	28,61	4947,73
500	1	10	2393,02	293,91	5225,11
	2	0	*	*	*

Çizelge 3.6’da görüldüğü gibi, her müşteri seviyesinde, parçalama yöntemi sayısı iki olduğunda bulunan ortalama çözüm süreleri daha büyüktür. Bu artışın grafiksel gösterimi Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Çizelge 3.6’da verilen değerlerde ve Şekil 3.2’de çizilen grafikte görüldüğü gibi özellikle müşteri sayısı 250 ve 500 için parçalama yöntemi sayısının 2 olması çözüm sürelerini belirgin şekilde artırmıştır.



Şekil 3. 2. Müşteri sayısı ve parçalama yöntemi sayısı beraberince incelendiğinde çözüm süreleri

Bu çalışmada öne sürülen problemin çözümü amacıyla üretilen deneysel problemlerin birbirlerine göre bir farklılığı da tasarlanan ağ tipidir. Problemler, G, G_Y ve G_Y_Z olmak üzere üç farklı ağ tipinde oluşturulmuştur. Her bir ağ tipi için oluşturulan örnek sayısı 450’dir. Çizelge 3.7’de, her bir ağ tipi için oluşturulan problemlerden, 7200 saniyelik üst limit dolmadan kesin çözümü bulunan örnek sayısı, problemlerin ortalama çözüm süreleri ve en büyük ve en küçük çözüm süreleri gösterilmiştir. Çizelge 3.7’de sunulan veriler, ağ tipindeki değişimin hem süresi içinde çözüm bulunan örnek sayısında ve hem de ortalama çözüm sürelerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığını göstermektedir.

Çizelge 3. 7. Farklı ağ tiplerindeki örnekler için çözüm süreleri

Ağ Tipi	Süre İçinde Sonuç Bulunan Örnek Sayısı	Ortalama Çözüm Süresi (s.)	En küçük Çözüm Süresi (s.)	En büyük Çözüm Süresi (s.)
G	302	374,98	0,09	6023,63
G_Y	304	417,57	0,05	6046,38
G_Y_Z	297	401,58	0,11	5624,81

Deneysel çalışma amacıyla üretilen problemlerinin birbirlerine göre bir farklılığı da ürün sayılarıdır. Ürün sayısı 2, 3 ve 5 olmak üzere üç farklı grup problem üretilmiştir ve her bir gruptaki örnek problem sayısı 450’dir. Çizelge 3.8’de, farklı ürün sayısı seviyeleri için çözülen problemler için bulunan ortalama çözüm süresi, en küçük çözüm süresi, en büyük çözüm süresi ve 7200 saniyelik üst çalıştırma limiti içinde en iyi çözümü bulunabilen örnek sayıları gösterilmiştir. Çizelge 3.8’deki veriler ışığında, ürün sayısı arttıkça ortalama çözüm süresinin arttığı ve kısıtlanan süre içinde en iyi çözümün bulunduğu problem sayısının azaldığı görülmüştür.

Çizelge 3. 8. Farklı ürün sayıları için çözüm süreleri

Ürün Sayısı	Süre İçinde Sonuç Bulunan Örnek Sayısı	Ortalama Çözüm Süresi (s.)	En küçük Çözüm Süresi (s.)	En büyük Çözüm Süresi (s.)
2	342	289,79	0,05	5225,11
3	290	315,98	0,11	6046,38
5	271	623,20	0,27	6023,63

Örnek problemler oluşturulurken, her bir müşteri sayısı seviyesi için üç farklı aday toplama tesisi sayısı belirlenmiştir, bu bağlamda, her bir grupta toplam 90 örnek problem oluşturulmuştur. Çizelge 3.9’da her bir müşteri sayısı ve her bir aday tesis sayısı seviyeleri için üretilen örnek problemler için bulunan ortalama çözüm süreleri, en küçük ve en büyük çözüm süreleri ile 7200 saniyenin altında en iyi çözümüne ulaşılmış örnek sayıları gösterilmiştir. Bunlardan, müşteri sayısı 500 olduğunda, aday toplama tesisi sayısı 120 ve 180 için oluşturulan 90 örnekten hiç biri 7200 saniyenin altında çözülememiştir. Bu nedenle, Çizelge 3.9’da bu problemlere ait ortalama çözüm süresi, en küçük ve en büyük çözüm süreleri sütunları “*” ile işaretlenmiştir.

Çizelge 3. 9. Farklı müşteri sayıları ve aday tesis sayıları için çözüm süreleri

Müşteri Sayısı	Aday Toplama Tesisi Sayısı	Süre İçinde Sonuç Bulunan Örnek Sayısı	Ortalama Çözüm Süresi (s.)	En küçük Çözüm Süresi (s.)	En büyük Çözüm Süresi (s.)
25	8	90	13,58	0,05	504,42
	10	90	13,92	0,11	622,72
	15	90	29,83	0,16	813,78
50	10	90	100,36	0,17	1686,45
	15	90	130,36	0,28	3390,22
	20	90	330,34	0,31	5463,05
100	20	90	476,26	0,83	6023,63
	35	89	575,92	2,68	5502,19
	45	90	820,15	9,55	5356,03
250	45	36	894,27	28,61	5624,81
	65	29	1614,95	90,05	6046,38
	90	17	1892,08	183,47	5204,86
500	80	10	2393,02	293,91	5225,11
	120	0	*	*	*
	180	0	*	*	*

Çizelge 3.9’da gösterilen ortalama çözüm süreleri incelendiğinde, her bir müşteri sayısı seviyesi için aday toplama tesisi sayısındaki artışın, problemin çözüm süresini arttırdığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, müşteri sayısı 500 olduğunda ve aday toplama tesisi sayısı 120’yi aştığında hiçbir problemin 7200 saniyelik çalıştırma zamanı üst limiti içerisinde en iyi sonuca ulaşarak çözülemediğini göstermektedir.

Tersine lojistikte farklı ürün geri kazanım seçeneklerinin incelendiği ağ tasarım probleminin çözümü amacıyla geliştirilen matematiksel modelin farklı özelliklerde ve farklı büyüklüklerdeki problemleri çözme performansın analizi amacıyla üretilen 1350 adet deneysel problemin GAMS 22.5 yazılımının Cplex çözücüsü yardımıyla çözülmesi sonucu elde edilen çözüm sürelerinin müşteri sayısı, aday toplama tesisi sayısı, parçalama yöntemi sayısı, ürün sayısı ve ağ tipine göre farklı analizleri yapılarak sonuçlar yorumlandıktan sonra, tüm parametrelerin birlikte ele alındığı bir analiz yapılmıştır. Buna göre G, G_Y ve G_Y_Z ağ tipleri için çözülen problemlerin tüm parametrelere göre ortalama çözüm süreleri incelenmiştir. Her bir problem grubunda 5 adet örnek problem vardır. Parçalama yöntemi, ürün sayısı, müşteri

sayısı ve aday toplama tesisi sayısı için o grupta süresi içinde çözülebilen örnek sayısı ve süresi içinde çözülen bu örneklerin ortalama çözüm süreleri gösterilmiştir. Eğer bir gruptaki örnek problemlerin hiçbirisi süresi içinde çözülememişse bu gruba ait ortalama çözüm süresi hücresi “*” ile işaretlenmiştir. Çizelge 3.10, Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12’de sırasıyla G, G_Y, G_Y_Z ağlarının tasarımı amacıyla üretilen problemlere ait çözüm süreleri gösterilmiştir.

Çizelge 3. 10. G tipi ağ için çözülen örneklerin ortalama çözüm süreleri

Müşteri Sayısı	Aday Toplama Tesisi Sayısı	Ürün Sayısı	Parçalama Yöntemi Sayısı 1 olduğunda		Parçalama Yöntemi Sayısı 2 olduğunda	
			7200 s. altında çözülebilen örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi	7200 s. altında çözülebilen örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi
25	8	2	5	0,31	5	0,53
		3	5	0,89	5	1,85
		5	5	3,24	5	12,40
	10	2	5	1,07	5	0,79
		3	5	0,61	5	1,05
		5	5	5,59	5	8,99
	15	2	5	0,67	5	1,34
		3	5	2,15	5	3,10
		5	5	7,05	5	182,59
50	10	2	5	0,71	5	0,68
		3	5	15,67	5	11,51
		5	5	86,46	5	329,72
	15	2	5	1,11	5	1,57
		3	5	4,63	5	5,05
		5	5	145,24	5	713,28
	20	2	5	2,28	5	5,28
		3	5	8,10	5	8,60
		5	5	222,25	5	422,91
100	20	2	5	5,59	5	3,87
		3	5	17,07	5	1473,64
		5	5	768,25	5	2202,53
	35	2	5	23,47	5	446,97
		3	5	46,13	5	143,31

Çizelge 3. 10. (Devam) G tipi ağ için çözülen örneklerin ortalama çözüm süreleri

Müşteri Sayısı	Aday Toplama Tesisi Sayısı	Ürün Sayısı	Parçalama Yöntemi Sayısı 1 olduğunda		Parçalama Yöntemi Sayısı 2 olduğunda	
			7200 s. altında çözülebilen örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi (s.)	7200 s. altında çözülebilen örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi (s.)
100	35	5	5	638,78	5	1278,52
	45	2	5	78,59	5	68,63
		3	5	123,74	5	1435,64
		5	5	973,67	5	1004,29
250	45	2	4	68,99	5	434,89
		3	2	109,70	1	3083,67
		5	0	*	0	*
	65	2	4	866,56	3	1069,08
		3	4	2168,42	0	*
		5	0	*	0	*
	90	2	4	940,17	1	3035,03
		3	2	3611,29	0	*
		5	0	*	0	*
		5	0	*	0	*
500	80	2	3	4811,33	0	*
		3	0	*	0	*
		5	0	*	0	*
	120	2	0	*	0	*
		3	0	*	0	*
		5	0	*	0	*
	180	2	0	*	0	*
		3	0	*	0	*
		5	0	*	0	*
		5	0	*	0	*

Çizelge 3. 11. G_Y tipi ağ için çözülen örneklerin ortalama çözüm süreleri

Müşteri Sayısı	Aday Toplama Tesisi Sayısı	Ürün Sayısı	Parçalama Yöntemi Sayısı 1 olduğunda		Parçalama Yöntemi Sayısı 2 olduğunda	
			7200 s. altında çözülebilen örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi	7200 s. altında çözülebilen örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi
25	8	2	5	0,24	5	0,28
		3	5	0,58	5	0,76
		5	5	3,86	5	137,28
	10	2	5	2,59	5	1,15
		3	5	0,46	5	1,04
		5	5	20,85	5	20,86
	15	2	5	0,42	5	2,00
		3	5	1,43	5	1,69
		5	5	10,05	5	38,21
50	10	2	5	0,92	5	0,61
		3	5	1,39	5	6,89
		5	5	34,85	5	206,70
	15	2	5	1,58	5	29,89
		3	5	1,24	5	33,78
		5	5	74,45	5	525,72
	20	2	5	1,51	5	3,14
		3	5	2,94	5	38,50
		5	5	149,83	5	1758,59
100	20	2	5	5,92	5	11,09
		3	5	15,09	5	158,35
		5	5	230,73	5	789,89
	35	2	5	23,72	5	200,41
		3	5	205,25	4	2124,95
		5	5	1200,21	5	1075,66
	45	2	5	44,74	5	60,33
		3	5	936,40	5	1368,65
		5	5	2350,76	5	1427,69
250	45	2	5	283,75	5	2310,01
		3	4	2877,36	1	561,89
		5	0	*	0	*
	65	2	5	1840,03	4	678,67
		3	3	3416,73	1	4947,73

Çizelge 3. 11. (Devam) G_Y tipi ağ için çözülen örneklerin ortalama çözüm süreleri

Müşteri Sayısı	Aday Toplama Tesisi Sayısı	Ürün Sayısı	Parçalama Yöntemi Sayısı 1 olduğunda		Parçalama Yöntemi Sayısı 2 olduğunda	
			7200 s. altında çözülebilen örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi	7200 s. altında çözülebilen örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi
250	65	5	0	*	0	*
	90	2	4	2525,06	0	*
		3	1	2163,69	0	*
		5	0	*	0	*
500	80	2	3	636,35	0	*
		3	0	*	0	*
		5	0	*	0	*
	120	2	0	*	0	*
		3	0	*	0	*
		5	0	*	0	*
	180	2	0	*	0	*
		3	0	*	0	*
		5	0	*	0	*
		5	0	*	0	*

Çizelge 3. 12. G_Y_Z tipi ağ için çözülen örneklerin ortalama çözüm süreleri

Müşteri Sayısı	Aday Toplama Tesisi Sayısı	Ürün Sayısı	Parçalama Yöntemi Sayısı 1 olduğunda		Parçalama Yöntemi Sayısı 2 olduğunda	
			7200 s. altında çözülebilen örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi	7200 s. altında çözülebilen örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi
25	8	2	5	0,22	5	0,62
		3	5	0,27	5	2,51
		5	5	59,13	5	19,39
	10	2	5	0,33	5	1,92
		3	5	0,66	5	2,49
		5	5	43,51	5	136,66
	15	2	5	0,38	5	0,54
		3	5	1,45	5	3,03

Çizelge 3. 12. (Devam) G_Y_Z tipi ağ için çözülen örneklerin ortalama çözüm süreleri

Müşteri Sayısı	Aday Toplama Tesisi Sayısı	Ürün Sayısı	Parçalama Yöntemi Sayısı 1 olduğunda		Parçalama Yöntemi Sayısı 2 olduğunda	
			7200 s. altında çözülebilen örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi (s.)	7200 s. altında çözülebilen örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi (s.)
25	15	5	5	225,26	5	55,59
50	10	2	5	13,68	5	1,18
		3	5	3,67	5	2,86
		5	5	790,18	5	298,85
	15	2	5	3,96	5	2,08
		3	5	6,81	5	2,71
		5	5	376,58	5	416,87
	20	2	5	3,13	5	2,86
		3	5	9,85	5	17,41
		5	5	764,34	5	2524,60
	100	20	2	1,96	5	14,49
			3	30,07	5	100,08
			5	1820,27	5	923,86
		35	2	9,60	5	47,67
			3	58,86	5	214,14
			5	1450,25	5	1488,53
		45	2	53,63	5	1426,47
			3	73,83	5	408,52
			5	1925,67	5	1271,19
250	45	2	5	106,76	3	592,93
		3	2	3146,22	0	*
		5	0	*	0	*
	65	2	5	650,16	1	2192,06
		3	0	*	0	*
		5	0	*	0	*
	90	2	3	2036,04	2	3323,48
		3	0	*	1	331,63
		5	0	*	0	*
	500	2	4	1896,79	0	*
		3	0	*	0	*
		5	0	*	0	*

Çizelge 3. 12. (Devam) G_Y_Z tipi ağ için çözülen örneklerin ortalama çözüm süreleri

Müşteri Sayısı	Aday Toplama Tesisi Sayısı	Ürün Sayısı	Parçalama Yöntemi Sayısı 1 olduğunda		Parçalama Yöntemi Sayısı 2 olduğunda	
			7200 s. altında çözülebilir örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi (s.)	7200 s. altında çözülebilir örnek sayısı	Ortalama Çözüm Süresi (s.)
500	120	2	0	*	0	*
		3	0	*	0	*
		5	0	*	0	*
	180	2	0	*	0	*
		3	0	*	0	*
		5	0	*	0	*

Deneysel çalışma kapsamında üretilen 1350 örnek problemten bazıları için elde edilen sonuçlar Ek-3’de gösterilmiştir. Burada, her bir problemin çözüm süresi ve bulunan sonuç gösterilmiştir. Eğer bir problem 7200 saniyenin altında çözülememişse, bu durumda ise programın çalışmayı durdurduğu zaman ve o ana kadar elde edilen en iyi sonuç çizelgede gösterilmiştir.

Bu çalışmada ele alınan tersine lojistikte ağ tasarımı probleminin çözümü için önerilen karma tamsayılı doğrusal matematiksel modelin çözüm performansını analiz etmek amacıyla yapılan deneysel çalışmanın sonuçları yorumlandığında, müşteri sayısının 100’den büyük olduğu örneklerin yalnızca % 17’sinin kabul edilebilir bir çözüm süresi olarak önerilen 7200 saniyenin altında çözülebildiği görülmüştür.

Aday toplama tesisi sayısının büyümesinin çözüm süresini artırdığı gözlemlenmiştir. 250 müşterili örneklerden aday toplama tesisi sayısı 45 olduğunda bu gruptaki örnek problemlerin % 40’ı 7200 saniyenin altında bir sürede çözülebilirken; aday toplama tesisi sayısı 90 olduğunda bu oranın % 19’a düştüğü belirlenmiştir. Ortalama çözüm süresi ise, aday toplama tesisi sayısı 90 olduğunda, aday toplama tesisi sayısı 45 olduğu duruma göre 2.12 katına çıkmıştır.

Bunun yanı sıra ürün sayısındaki artışın problemlerin çözüm süresini artırdığı gözlemlenmiştir. Ürün sayısı 2 olan örneklerin % 76'sı 7200 saniyenin altında ve 289,79 saniyelik bir ortalama çözüm süresi içinde sonuçlandırılabilirken; ürün sayısı 5 olduğunda 7200 saniyeden düşük bir zamanda çözülebilen örnek oranı % 60'a gerilerken, çözülen örneklerin ortalama çözüm zamanı ise 2.15 katına çıkarak 623,20 saniye olmuştur.

Ürün geri kazanım yöntemlerine göre geri dönüşüm, yeniden üretim ve zararlı atıkların işlenmesi seçeneklerinin farklı ağ tasarım tipleri olarak ele alındığı deneysel çalışmada, farklı ağ tipleri için çözüm sürelerinde önemli değişiklikler olmadığı gözlemlenmiştir. Karar vericiye ürün geri kazanımı yöntemi seçiminde esneklik sağlayan bu unsur, problemin farklı seçenekler için sonuç ürettiğini göstermektedir.

Ürünlerin farklı parçalama yöntemi sayısına göre ayrıştığı durum dikkate alındığında ise toplam parçalama yöntemi sayısı iki olduğunda çözüm sürelerinin gözle görünür şekilde arttığı belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında öne sürülen tersine lojistikte ağ tasarımı probleminin çözümü için geliştirilen karma tamsayılı matematiksel modelin çözüm performansının analizi için yapılan deneysel çalışmanın sonucunda, müşteri sayısının 500'ü geçtiği, aday toplama tesisi sayısının 120 ve üzeri olduğu, ürün sayısının 5'i geçtiği ve parçalama yöntemi sayısının da iki ve daha fazla olduğu durumlar için üretilen problemlere kabul edilebilir zaman sınırları içinde çözüm bulunamamıştır. Bu çalışmada öne sürülen matematiksel modelin daha büyük boyutlu problemlerin çözümünde de kullanılabileceği teorik ve pratik çalışmalar göz önüne alınarak, problemlere daha kısa zamanlarda iyi sonuçlar verecek bir sezgisel yönteme ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Bu amaçla, problemin yapısı ve karar değişkenleri değerlendirilerek, Tavlama Benzetimi metasezgiselinin bu çalışmada öne sürülen problemin çözümünde kullanılabileceğine karar verilmiştir.

4. TAVLAMA BENZETİMİ (TB) YAKLAŞIMI

Farklı geri kazanım seçenekleri için çok ürünlü bir ağ tasarımının ele alındığı bu çalışmada ortaya konulan karma tamsayılı matematiksel modelin çözüm etkinliğini incelemek amacıyla oluşturulan test problemlerinin GAMS 22.5 yazılımı yardımıyla çözülmesi sonucu, müşteri sayıları, aday toplama tesisi sayıları ve ürün sayıları artarken çözüm süresinin de arttığı görülmüştür. Bu amaçla, bu çalışmada ortaya konulan matematiksel model kullanılarak, uygulamada veya teoride, daha büyük boyutlu problemlerde de kabul edilebilir sürelerde sonuç elde edilebilmesi amacıyla bir metasezgisel kullanılabileceği kararlaştırılmıştır.

Mevcut problemin karar değişkenlerinin yapısına uygun olduğu düşüncesiyle TB metasezgiselinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu seçimin yapılmasındaki en önemli unsur, mevcut problemin çözümünü zorlaştıran ve toplama tesislerinin açılması kararını amaç fonksiyonuna taşıyan 0-1 değişkenlerdir. Ortaya konulan modelde, 0-1 değişkenlerle ifade edilen bu açılma kararları alındıktan sonra geriye kalan problem bir aktarmalı ulaştırma problemidir. Mevcut problemi, polinomial zamanda çözülebilen bu probleme indirgemenin en kolay yolu, açılma kararlarını sezgisel olarak alma ve bu kararların neticesi olan değişken değerlerini girdi kabul eden yeni bir model oluşturmaktır.

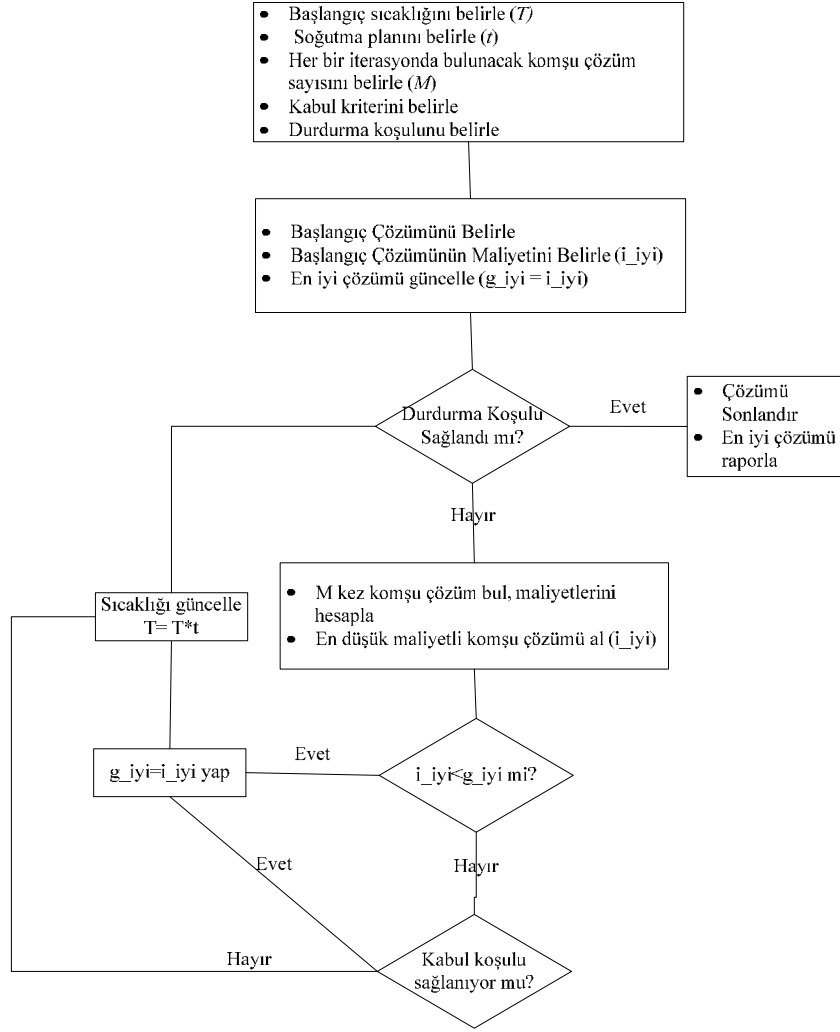
Bu çalışmada öne sürülen problemin, TB algoritması kullanılarak çözülmesi süreci adım adım incelenmiştir. Öncelikle TB yöntemi ve bu yöntemin en iyileme problemlerinin çözümünde kullanılma şekli tanımlanmıştır. Sonrasında, bu tez çalışmasında öne sürülen örnek problemlerin çözümünde kullanılacak olan kodlama yapısı tespit edilmiştir. Komşu çözümler içinde yeni çözümler aranırken başvuru hareket mekanizması ve problemlerin başlangıç çözümlerinin belirlenmesi için bir sistematik geliştirilmiştir. Bu çalışmada ele alınan problemin yapısına en uygun TB temel parametrelerinin belirlenmesi amacıyla farklı boyutlardaki problemler üzerinde bir parametre en iyilemesi yapılmıştır. Bu denemelerin sonucu olarak elde edilen parametre değerleri kullanılarak deneysel çalışmada üretilen tüm problemler

özölmüştür. Problemlerin GAMS 22.5 yazılımı ile özölmesi sonucu elde edilen veriler ile TB ile çözümü sonucu elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

4.1. TB Metasezgiseli

TB, Metropolis ve ark. (1953)'de metallerin tavlanması süreci ile ilgili bulgularının, zor kombinatoriyel problemlerin çözümünde kullanılabileceğı düşüncesiyle ilk olarak Kirkpatrick ve ark. (1983)'de tanıtılan stokastik bir arama algoritmasıdır. Literatürde, çok sayıda değışik problem tipinin çözümünde kullanılmıştır. TB ve uygulama alanları ile ilgili detaylı bilgi Van Laarhoven ve Aarts (2010) ve Schneider ve Kirkpatrick (2006)'da bulunabilir.

Genel bir TB algoritmasının işleyişi algoritmik olarak Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Buna göre, bir TB özümü, öncelikle TB'nin temel parametreleri olan başlangıç sıcaklığı (T), soğutma planı (t), her bir iterasyonda bulunacak komşu çözüm sayısı (M), kabul koşulu ve durdurma koşulu belirlenerek başlar. Bunun yanı sıra, ilgili problemin karar değışkenlerinin nasıl kodlanacağı, komşu çözümler içinde nasıl bir hareket mekanizması kullanılarak yeni çözümlere ulaşılacağı ve başlangıç çözümünün nasıl belirleneceğı de uygulayıcının alması gereken kararlardandır.



Şekil 4. 1. Genel bir TB algoritması

4.2. Matematiksel Modelin Çözümünde Kullanılacak TB Temelli Yaklaşım (TBTY)

4.2.1 Kodlama yapısı

Bu çalışmada ortaya konulan ağ tasarım problemi ve bu problemin çözülmesi amacıyla geliştirilmiş olan karma tamsayı matematiksel modelin karar değişkenleri incelendiğinde, tesisler arası ve müşteriler ile tesisler arası ulaştırma kararlarının sürekli değişkenler, müşterilerden geri alınan ürünlerin hangi parçalama yöntemine göre hangi toplama tesisinde kaç adet parçalanacağı kararının tamsayı değişken olduğu görülmektedir. Bu karar değişkenlerine ek olarak, aday toplama tesisleri

seçenekleri içinde hangilerinin açılacağı kararı 0-1 tamsayılı değişken olarak tanımlanmıştır. Literatürde, farklı problemlerin TB algoritması kullanılarak kodlandığı çok sayıda çalışma mevcuttur. Ancak bu çalışmada ele alınan problem, 0-1 tamsayılı değişkenlere sezgisel çözüm yüklemekle amaç fonksiyonu değerinin elde edilebileceği bir problem sınıfına dahil değildir. Bu nedenle, aday tesislerin açılma kararlarının alınmasından sonra problemin dönüşeceği aktarmalı ulaştırma modelinin çözümü için GAMS yazılımı kullanılmıştır. Üç adet aday toplama tesisinin olduğu ve her bir toplama tesisinin de dört farklı kapasite sınırında aılabileceği bir probleme ait örnek bir kodlama şekil 4.2’de verilmiştir. Herhangi bir çözüm kodlanırken, matematiksel modelin ilk kısıtı olan ve burada Eşitlik 4.1 ile gösterilen, bir tesis yalnızca tek bir tipte açılabilir kısıtı dikkate alınmalıdır. Zira, üretilen herhangi bir sezgisel çözümün uygun çözüm olup olmadığı ancak o özüm GAMS ile özıldüğünde anlaşılabilecektir.

$$\sum_j Y_{l,j}^C \leq 1 \quad \forall l \quad (4.1)$$

Burada,

j : Toplama tesisi tipleri;

l : Aday toplama tesisi konumları;

$Y_{l,j}^C = 1$ Eğer l ’de j tipinde bir toplama tesisi açılmış ise;

$Y_{1,1}^C$	$Y_{1,2}^C$	$Y_{1,3}^C$	$Y_{1,4}^C$	$Y_{2,1}^C$	$Y_{2,2}^C$	$Y_{2,3}^C$	$Y_{2,4}^C$	$Y_{3,1}^C$	$Y_{3,2}^C$	$Y_{3,3}^C$	$Y_{3,4}^C$
0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1

şekil 4. 2. Örnek bir kodlama yapısı

4.2.2. Hareket mekanizması

Hareket mekanizması, TB’nin mevcut bir çözümde yeni bir çözüm üretmesi için izleyeceği yoldur. Literatürde, TB kullanılarak özölen problemler incelendiğinde, en sık kullanılan hareket mekanizmalarının değiştirme (swap) veya ekleme (insert)

olduğu görülmektedir. Ancak burada ele alınan problemde, bu yöntemler kullanıldığında, Eşitlik 4.1'in ihlal edildiği durumların ortaya çıkma ihtimali çok yüksektir. Bu nedenle, bu çalışmada aşağıda adımları belirtilen hareket yöntemi seçilmiştir:

Her bir aday toplama tesisi j farklı tipte açılabilir, l adet aday toplama tesisi vardır;

Rasgele bir toplama tesisi seç ($\alpha \in \{1, 2, \dots, l\}$);

Eğer bu toplama tesisi açılmamışsa, bu toplama tesisini birinci tipte aç ($Y_{\alpha,1}^C = 1$);

Eğer bu toplama tesisi halihazırda en büyük şekilde açılmışsa bir küçült ($Y_{\alpha,j}^C = 0, Y_{\alpha,j-1}^C = 1$);

Eğer bu toplama tesisi halihazırda en küçük şekilde açılmışsa bir rasgele sayı üret (θ),

Eğer, ($\theta < 0.5$) ise tesisi kapat ($Y_{\alpha,1}^C = 0$)

Eğer, ($\theta > 0.5$) ise tesisi büyüt ($Y_{\alpha,1}^C = 0, Y_{\alpha,2}^C = 1$)

Eğer bu toplama tesisi, $1 < \beta < j$ aralığındaki bir büyüklükte açılmışsa, bir rasgele sayı üret (θ),

Eğer, ($\theta < 0.5$) ise tesisi küçült ($Y_{\alpha,\beta}^C = 0, Y_{\alpha,\beta-1}^C = 1$)

Eğer, ($\theta > 0.5$) ise tesisi büyüt ($Y_{\alpha,\beta}^C = 0, Y_{\alpha,\beta+1}^C = 1$)

4.2.3. Başlangıç çözümünün belirlenmesi

Bir metasezgisel yaklaşımda, başlangıç çözümünün iyi seçilmesi, çözüm uzayında daha iyi sonuçlara daha uygun zamanlarda ulaşabilmesi açısından önemlidir. Literatürde, bazı problemlere rasgele başlangıç çözümleri üretilerek TB çözülsün bile, bazı çalışmalarda da başlangıç çözümünün bulunması için ayrıca bir sezgisel yöntemle başvurulmaktadır.

Bu çalışmada öne sürülen problemin yapısı incelendiğinde, herhangi bir çözümden yeni bir çözüm üretildiğinde, mümkün olmayan bir sonuçla karşılaşma şansının çok fazla olduğu görülmektedir. Bu nedenle, rasgele bir başlangıç çözümü ile başlayan bir TB'nin uzun süre mümkün olmayan çözümler uzayından çıkamayacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda, bu problemin TB ile çözümünde, başlangıç çözümünün seçimi amacıyla GAMS 22.5 yazılımından yararlanılmıştır. GAMS 22.5 yazılımı, bir karma tamsayılı probleme ispatlanmış en iyi sonucu verebildiği gibi, en iyi sonuç ile kullanıcı tarafından kabul edilebilir bir sonuç arasında da bir değer üretebilir. GAMS yazılımında bu amaçla kullanılan parametre *optcr* ve varsayılan değeri “0.0”dır. *Optcr* parametresi, yüzde şeklinde ifade edilir ve yazılımın sonuç aramasını ispatlanmış en iyi çözüme yüzde kaç oranında yaklaştığında kesebileceğini belirtmektedir. Bu yöntemle probleme kısa zamanda bir çözüm bulunmakta ancak bu çözümün en iyi çözümden en fazla yüzde kaç kötü olduğu bilinmemektedir. Literatürde, böylesi bir başlangıç çözümü kullanan başka bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Her bir problem için, *optcr* parametresi kullanılarak bulunan bir çözüme ait tesis açılma kararlarını TB'ye başlangıç çözümü olarak almanın, iyi çözümlere ulaşmak konusunda avantaj sağlayacağı düşünülmüştür. Ancak bu işlem fazladan bir hesaplama zamanı doğuracağı için bu karar analiz edilmiştir. Bu amaçla, incelenen test problemlerinden farklı büyüklüklerde 45 tanesi seçilerek sırasıyla en fazla % 30, % 25, % 20, % 15 ve % 10 hatalı sonuçların ne kadar zamanda üretildiği ve bu zaman aralığında üretilen sonucun o problem için bulunan en iyi sonuçtan ne kadar farklı olduğu analiz edilmiştir. Seçilen problemler, her bir müşteri sayısı (25, 50, 100, 250 ve 500) için eşit sayıda seçilmiştir. Müşteri sayılarına göre elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Çizelge 4.1'de, *optcr* parametresinin aldığı değerler “Görelî Sapma” olarak ifade edilmiştir. Çizelgede, görelî sapmanın her bir değeri için ortalama çözüm süresi (O.Ç.S.) değeri saniye olarak ve o probleme bulunan sonuç ile o problemin bilinen en iyi çözümü arasındaki ortalama sapma (O.S.) yüzde olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4. 1. Başlangıç çözümünün belirlenmesi için yapılan analiz

Görelî Sapma (%)	Ölçülen Değerler	Müşteri Sayıları				
		25	50	100	250	500
30	O. Ç. S.	0,16	0,19	0,75	9,55	75,08
	O. S. (%)	32,05	26,94	30,98	26,95	18,88
25	O. Ç. S.	0,16	0,23	1,12	9,84	84,60
	O. S. (%)	20,07	23,07	22,07	23,04	15,59
20	O. Ç. S.	0,19	0,25	1,34	12,34	87,30
	O. S. (%)	7,87	13,07	14,55	14,66	14,96
15	O. Ç. S.	0,23	0,32	1,48	12,91	96,67
	O. S. (%)	7,20	9,12	9,69	11,44	12,04
10	O. Ç. S.	0,24	0,34	1,53	13,31	102,40
	O. S. (%)	5,07	6,25	7,85	7,19	7,06

Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi, görelî sapma yüzdesi arttıkça çözüm süresi azalmakta ancak çözüm kalitesi düşmektedir. Her bir müşteri sayısı sınıfı için, çözüm süreleri ile ortalama sapmalar arasındaki ters orantı, neredeyse tüm çözümlerde korunmuştur. Bu nedenle, TB ile mevcut problemin çözümünde, başlangıç çözümü olarak, problemin Çizelge 4.1’de gösterilen deneysel çalışmanın orta noktası olan % 20’lik sapmada aldığı değerlerin kullanılabileceği görülmüştür.

4.2.4. Kabul koşulu

TB’yi, tepe tırmanma ve rassal arama gibi temel sezgisellerden ayıran en önemli özelliği, belli bir kabul koşuluyla kötü çözümlerin kabul edilebilmesidir. Bu özellik, TB’yi yerel en iyi çözümlerden kurtararak arama uzayında farklı çözüm bölgelerini de aramasını sağlamaktadır. Bu çalışmada ele alınan problemin TB ile çözümü sırasında, literatürde en sık kullanılan ve Eş. 4.2’de matematiksel olarak gösterilen kabul koşulu kullanılmıştır.

Δ : Bulunan kötü çözüm ile en iyi çözüm arasındaki maliyet farkı olsun;

T' : O iterasyonda sistem sıcaklığı olsun;

$$P_{kabul} = e^{-\left(\frac{\Delta}{T'}\right)} \quad (4.2)$$

Algoritmik olarak ise, herhangi bir iterasyonda bulunan bir kötü çözüm için P_{kabul} hesaplanır. P_{kabul} , $(0-1]$ aralığında bir sayıdır. Bu kabul şartının sağlanıp sağlanmayacağı ise bir rasgele sayı belirlenip P_{kabul} ile kıyaslanarak belirlenir.

4.3. Problem Yapısına En Uygun TB Parametrelerinin Seçimi

TB ile problem çözümünde verilmesi gereken kararlardan birisi de, yönteme ait başlangıç sıcaklığı, soğutma planı, her bir iterasyondaki tekrar sayısı ve durdurma koşulu gibi parametrelerin seçimidir. Bu nedenle, bu çalışmada tanıtılan problem için en iyi sonuçları veren parametre kümesini elde etmek amacıyla bir deneysel çalışma yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle tüm problem evrenini yansıtacağı düşünülen bir deney kümesi belirlenmiştir. Bu belirleme işlemi yapılırken problemlerin kısa zamanlarda çözülebileceği öngörülerek müşteri sayısı 50 ve 100 olan problem gruplarından örnekler seçilmiştir ve toplam örnek sayısı 36'dır. Bunlardan, müşteri sayısı 50 olan problemler için aday toplama tesisi sayıları 15; müşteri sayısı 100 olan örnekler için ise aday toplama tesisi sayısı 35'tir. Bunların yarısı 50 müşterili ve yarısı da 100 müşterilidir. Ele alınan problemlerin üçte biri 2 ürünlü, üçte biri 3 ürünlü ve yine üçte biri 5 ürünlü örneklerdir. Aynı şekilde problemlerin yarısı için tek bir parçalama yöntemi mevcutken, diğer yarısı için iki parçalama yöntemi mevcuttur. Seçilen bu problemlerin, farklı parametre kombinasyonları ile çözümleri sonucu elde edilen sonuçlar, mevcut problemin TB ile çözümünde seçilmesi uygun parametre seviyelerini gösterecektir. Bu amaçla, deneysel çalışmaya konu olan, başlangıç sıcaklığı seviyelerinin, soğutma planının, durdurma koşulunun ve tekrar sayısı seviyelerinin belirlenmesinde izlenen yollar sırasıyla açıklanmıştır. Deneysel çalışmada incelenen parametre seviyeleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

TB metasezgiselini tepe tırmanma ve rassal arama gibi daha temel yöntemlere üstün kılan yegane özelliği, belli koşullarda kötü bir çözümün de kabul edilmesi ve arama uzayındaki yerel en iyi değerlerden kaçınılabilmesidir. Bu amaçla başlangıç sıcaklığının (T) seçimi önemlidir. Diğer yandan, ele alınan problemler gerek boyut ve gerekse de parametrelerin değerleri açısından farklılık arz etmektedir. Problemler

çözülürken bu farklılığın başlangıç sıcaklığına yansıtılması gerekmektedir. Bu amaçla, problemdeki tüm aday toplama tesisleri olabilecek en büyük hallerinde açıkken sistemin GAMS yazılımı ile çözümü sonrası elde edilen amaç fonksiyonu değeri, probleme özel ve problemin maliyetlerini yansıtan bir girdi olarak karşımıza çıkmaktadır. Tüm tesisler açıkken elde edilen bu amaç fonksiyonu değeri Çizelge 4.2’de $\tilde{O}$ simgesiyle gösterilmiştir. TB metasezgiselinin iyi sonuçlara ulaşmasında etkili bir diğer parametre de her bir iterasyondaki tekrar sayısı (M)’dir. M parametresinin, mevcut komşuluk aralığını mümkün olduğunca kapsamayı, bir başka deyişle tek bir iterasyonda, bir çözümden tek bir hareketle ulaşılabilir komşu çözümlerin oldukça fazlasını taraması istenmektedir. Bu amaçla, bu deneysel çalışmada M parametresi, her bir problemdeki aday toplama tesisi sayısının (I) bir oranı olarak alınmıştır. Soğutma planı (t) olarak ise 0.90 ve 0.95 oranları alınmıştır. Durdurma koşulu ise, her bir problemin aday toplama tesisi sayısı (I) ‘nin bir oranı olmak üzere bir çözüm zamanını yansıtmaktadır. Tanımlanan ve seviyeleri belirlenen bu parametreler Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 2. Parametre seviyeleri

Parametre	T	t	M	Durdurma Koşulu (s.)
Seviyeler	$\tilde{O} * 0,05$	0.90	$I / 3$	$I * 4$
	$\tilde{O} * 0,10$	0.95	$I / 2$	$I * 8$

Çizelge 4.2’de verilen parametre seviyeleri kullanılarak, her problem için 16 farklı deneme hazırlanmıştır ve bu denemelerin her biri 4 kez çözülmüştür. Toplamda, 2304 deneme yapılmıştır. Her bir parametre için problemlerin çözümü sonucu elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin o problemler için bilinen en iyi çözüme göre sapması dikkate alınarak, problemler için en iyi sonuçları veren parametre kombinasyonu belirlenmiştir. Parametre en iyilemesi amacıyla yapılan bazı denemelerin örnek sonuçları Ek-4’te verilmiştir.

Bu çalışmada ele alınan problemin TB ile çözülmesi amacıyla, problemin yapısına en uygun parametre kümesinin belirlenmesi için yapılan denemeler sonucu elde edilen sonuçlar, her bir parametre için ayrı ayrı ele alınmıştır. Uygun parametre düzeyleri

belirlenirken, parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimi dikkate alınmıştır. Bunun yanı sıra, bu parametre en iyilemesi sonucu bulunacak olan parametre kümesinin farklı boyutlardaki problemlerin de çözümünde kullanılacağı dikkate alınarak, probleme bağlı farklılıklardan ziyade, tüm çözümler için en iyi parametre kümesi aranmıştır. Bu amaçla, öncelikle belirlenen 16 farklı deney düzeneği için bulunan sonuçlar analiz edilmiştir. Bu sonuçlar, Çizelge 4.3’de gösterilmiştir. Çizelge 4.3’de gösterilen veriler, başlangıç sıcaklığı (T), soğutma planı (t), her bir iterasyonda bulunacak komşu çözüm sayısı (M) ve durdurma koşulu olarak belirlenen deney düzeneğinin tüm kombinasyonları için tüm problemlerin çözümü sonucu elde edilen sonuçların, bu problemler için bulunan en iyi sonuçtan yüzde olarak ortalama sapmasıdır. Tüm problemler için yapılan çözümler için iki farklı parametre kümesi için aynı ortalama sapma değeri bulunmuştur. Hangi parametre kümesinin tüm problemlerin çözümünde kullanılacağına karar verirken, farklı problem tipleri için hangi alternatifin daha uygun olduğu analiz edilmiştir. Bu analizler yapılırken, ortalama sapma değeri yüksek olan diğer alternatifler elenmiştir ve $T = \tilde{O} * 0,05$, $t = 0,95$, $M = l / 2$ ve durdurma koşulu $l * 8$ olan alternatif, “1. Parametre Kümesi” ve $T = \tilde{O} * 0,10$, $t = 0,90$, $M = l / 2$ ve durdurma koşulu $l * 8$ olan alternatif, “2. Parametre Kümesi” olarak adlandırılmıştır.

Çizelge 4. 3. Uygun parametre kümesinin belirlenmesi

T	t	M	Durdurma Koşulu (s.)	Ortalama Sapma (%)
$\tilde{O} * 0,05$	0.90	$l / 3$	$l * 4$	1,24
			$l * 8$	1,09
		$l / 2$	$l * 4$	0,75
			$l * 8$	0,87
	0.95	$l / 3$	$l * 4$	0,97
			$l * 8$	0,86
		$l / 2$	$l * 4$	0,98
			$l * 8$	0,74

Çizelge 4. 3. (Devam) Uygun parametre kümesinin belirlenmesi

T	t	M	Durdurma Koşulu (s.)	Ortalama Sapma (%)
$\tilde{O} * 0,10$	0.90	$l/3$	$l * 4$	1,13
			$l * 8$	1,10
		$l/2$	$l * 4$	0,90
			$l * 8$	0,74
	0.95	$l/3$	$l * 4$	1,00
			$l * 8$	0,92
		$l/2$	$l * 4$	0,90
			$l * 8$	0,92

Bu çalışmada, TB algoritmasının probleme en iyi sonuçları veren parametre kümesinin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarına göre, tüm problemlere aynı ortalama sapma değerini bulan iki alternatif parametre kümesinden hangisinin seçileceğini belirlemek amacıyla, artan müşteri sayıları ve ürün sayıları için hangi parametre kümesinin daha etkin sonuçlar verdiği incelenmiştir. Çizelge 4.4’de, bu iki parametre kümesi kullanılarak yapılan çözümler için bulunan ortalama sapma değerleri yüzde olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4. 4. Müşteri sayısı ve ürün sayısına göre parametre kümelerinin analizi

Müşteri Sayısı	Ürün Sayısı	Parametre Kümesi	Ortalama Sapma (%)
50	2	1	1,73
		2	1,67
	3	1	0,38
		2	0,36
	5	1	0,17
		2	0,12
100	2	1	0,85
		2	1,07
	3	1	0,29
		2	0,28
	5	1	1,01
		2	0,96

Çizelge 4.4’de verilen değerler incelendiğinde, “2. Parametre Kümesi” kullanılarak bulunan sonuçların, 100 müşterili ve 2 ürünlü problemler dışında tüm problem tiplerinde “1. Parametre Kümesi” kullanılarak bulunan sonuçlardan daha düşük bir

ortalama sapma yüzdesine sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, Çizelge 4.4’de verilen değerler, müşteri sayısı ve ürün sayısı artsa bile TB’nin iyi sonuçlar verebileceğini göstermesi açısından önemlidir. Zira, müşteri sayısı 50 olduğunda, ürün sayısı 5 olan örnekler için % 0,12 oranında bir sapma ile sonuçlar bulunmuştur. Bu sonuçlarla, “2. Parametre Kümesi” olarak isimlendirilen ve $T = \tilde{O} * 0,10$, $t = 0,90$, $M = l / 2$ ve durdurma koşulu $l * 8$ olan parametre kümesinin tüm deneysel problemlerin çözümünde kullanılabileceği görülmüştür.

4.4. Tüm Deneysel Problemlerin TB Temelli Çözümü

Farklı ürün geri kazanım seçeneklerinin beraberce ele alındığı çok ürünlü ve çok sayıda farklı parçalama yöntemini dikkate alan bir tersine lojistik ağ tasarım probleminin incelendiği bu tez çalışmasında, öne sürülen matematiksel modelin çözüm süreleri üzerinde yapılan deneysel çalışma sonucu, üretilen problemlerin önemli bir kısmının kabul edilebilir zaman sınırları içinde çözülemediği görülmüştür. Bu nedenle, TB yaklaşımı kullanılarak, daha kısa sürelerde problemlere uygun sonuçlar bulmak amacıyla, öncelikle en uygun TB parametreleri belirlenmiştir ve bu parametreler kullanılarak tüm problemler, rassallık etkisini azaltmak amacıyla üçer kez çözülmüştür. TB temelli çözüm yaklaşımı kullanılarak elde edilen sonuçlar ile problemlerin GAMS 22.5 yazılımının Cplex çözücüsü yardımıyla bulunan sonuçları arasındaki farklılık “*sapma*” olarak tanımlanmıştır ve Eş. 4.3’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

Deneysel çalışma kapsamında oluşturulan 1350 problemin, problemin çözümü için önerilen karma tamsayılı matematiksel model yardımıyla, 7200 saniyelik çalıştırma süresi kısıtı dikkate alınarak çözülmesi sonucu, problemlerin 901 tanesi için en iyi sonucun bulunduğu, kalan 449 tanesi için ise çalıştırma süresi kısıtı içinde en iyi sonucun bulunamadığı görülmüştür. Bu 449 problem için, o ana kadar bulunan en iyi sonuç kaydedilmiştir. TB temelli çözüm yapılırken, sapma değerlerinin kıyaslamasını doğru yapmak açısından, matematiksel model kullanılarak en iyi sonucu, çalıştırma süresi kısıtı içinde bulunabilen problemler “*I. grup*”, bu süre

içinde en iyi sonucu bulunamayan ancak o ana kadar bulunan sonucu kaydedilmiş olan 449 örnek problem de “II. grup” olarak adlandırılmıştır ve farklı parametrelere göre TB temelli çözüm yaklaşımının etkinliği analiz edilirken çizelgeler her iki grup için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

En_iyi : GAMS 22.5 yazılımının Cplex çözücüsü ile bulunan sonuç;

TB : Tavlama benzetimi temelli çözüm yaklaşımı ile bulunan sonuç;

$$Sapma = \left[\frac{TB}{En_iyi} - 1 \right] * 100 \quad \text{Eş. 4.3}$$

I. grup problemler dikkate alındığında, problemlere GAMS 22.5 programı ile bulunan sonuçlardan, % 1,25 oranında bir ortalama sapma değeri bulunmuştur. Her bir çalıştırma ayrı ayrı değerlendirildiğinde ise birinci çalıştırmada ortalama % 1,18, ikincisinde ortalama % 1,25 ve üçüncüsünde de ortalama % 1,31 oranında bir sapma bulunmuştur. Bu değerlerin birbirine yakın olması, çözüm için kullanılan TB algoritmasının tutarlı sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Diğer yandan, II. grup problemlere TB temelli çözüm yaklaşımı ile bulunan sonuçlar incelendiğinde, bu problemlere GAMS 22.5 programı ile 7200 saniyede bulunan sonuçlara göre ortalama % 4,87 yaklaşık sonuçlar bulunmuştur. Her bir çalıştırma ayrı ayrı incelendiğinde ise, birinci çalıştırmada ortalama % 4,83, ikincisinde ortalama % 4,90 ve üçüncüsünde ise ortalama % 4,88 yaklaşık sonuçlar bulunmuştur.

Müşteri sayısı parametresi dikkate alındığında, I. grup ve II. grup problemler için bulunan sonuçların bu problemlerin bilinen en iyi sonuçlarına göre ortalama sapmaları ve her bir çalıştırmada bulunan sapma değerleri sırasıyla Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.5’de, değişen müşteri sayıları için TB temelli çözüm yaklaşımı ile I. grup problemlere bulunan sonuçların ortalama sapma değerleri incelendiğinde, tüm problemler dikkate alındığında tüm çalıştırmaların ortalama sapmasının % 1,25

olduğu hesaplanmıştır. Çizelge 4.6'da gösterilen II. grup problemler için ise bu ortalama sapma değeri % 4,87 olmuştur.

Çizelge 4. 5. I. grup problemler için farklı müşteri sayılarına göre bulunan sonuçlar

Müşteri Sayısı	Problem Sayısı	Her Bir Çalıştırmada Bulunan Ortalama Sapma Değerleri (%)			Tüm Çalıştırmaların Ortalama Sapması (%)
		1	2	3	
25	270	1,46	1,55	1,55	1,52
50	270	0,88	0,98	0,91	0,92
100	269	1,06	1,13	1,34	1,18
250	82	1,54	1,47	1,69	1,57
500	10	1,85	1,90	1,84	1,86

Çizelge 4. 6. II. grup problemler için farklı müşteri sayılarına göre bulunan sonuçlar

Müşteri Sayısı	Problem Sayısı	Her Bir Çalıştırmada Bulunan Ortalama Sapma Değerleri (%)			Tüm Çalıştırmaların Ortalama Sapması (%)
		1	2	3	
100	1	0,09	0,31	0,01	0,14
250	188	3,20	3,24	3,25	3,23
500	260	6,03	6,12	6,09	6,08

Deneysel çalışmada, ele alınan problemlerin çözüm süreleri üzerinde etkili bir diğer parametre de aday toplama tesisi sayısıdır. I. grup ve II. grup problemler için, değişen müşteri sayıları ve aday toplama tesisi sayıları için TB temelli çözüm yaklaşımı ile her bir çalıştırmada bulunan ortalama sapma değerleri ile her bir grup için her bir aday toplama tesisine karşılık gelen müşteri sayıları sırasıyla Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 7. I. grup problemler için aday toplama tesisi sayılarına göre tb ile bulunan sonuçlar

Müşteri Sayısı	Aday Toplama Tesisi Sayısı	Problem Sayısı	Her Bir Çalıştırmada Bulunan Ortalama Sapma Değerleri (%)			Tüm Çalıştırmaların Ortalama Sapması (%)
			1	2	3	
25	8	90	0,85	1,13	1,15	1,04
	10	90	1,64	1,53	1,67	1,61
	15	90	1,89	1,99	1,85	1,91
50	10	90	0,66	0,56	0,76	0,66
	15	90	0,99	0,95	0,91	0,95
	20	90	1,01	1,43	1,05	1,16
100	20	90	0,80	0,77	0,97	0,85
	35	89	0,99	1,41	1,47	1,29
	45	90	1,40	1,22	1,57	1,40
250	45	36	0,67	0,64	0,77	0,69
	65	29	1,50	1,69	1,93	1,71
	90	17	3,47	2,84	3,20	3,17
500	80	10	1,85	1,90	1,84	1,86

Çizelge 4. 8. II. grup problemler için aday toplama tesisi sayılarına göre tb ile bulunan sonuçlar

Müşteri Sayısı	Aday Toplama Tesisi Sayısı	Problem Sayısı	Her Bir Çalıştırmada Bulunan Ortalama Sapma Değerleri (%)			Tüm Çalıştırmaların Ortalama Sapması (%)
			1	2	3	
100	35	1	0,09	0,31	0,01	0,14
250	45	54	1,67	1,69	1,77	1,71
	65	61	3,16	3,21	3,28	3,22
	90	73	4,35	4,40	4,31	4,35
500	80	80	5,05	5,04	5,11	5,07
	120	90	6,12	6,39	6,25	6,25
	180	90	6,81	6,80	6,79	6,80

Bu tez çalışmasında ortaya konulan problemin, literatüre bir katkısı olarak görülen farklı sayıda parçalama yönteminin analizi için üretilen problemlere TB ile bulunan

sonuçların karşılaştırılması amacıyla, I. grup problemler için bulunan sonuçlar Çizelge 4.9'da, II. grup problemler için bulunan sonuçlar da Çizelge 4.10'da gösterilmiştir. Burada, değişen müşteri sayıları için, öncelikle parçalama yöntemi sayısı 1 olduğunda sonrasında ise parçalama yöntemi sayısı 2 olduğunda bulunan sonuçların her bir çalıştırma için ortalama sapma değerleri gösterilmiştir. Burada, her bir müşteri seviyesi için, parçalama yöntemi sayısındaki değişikliğin, problemlere bulunan sonuçların ortalama sapma değerleri üzerinde önemli bir değişiklik yapmadığı görülmüştür. Bunun yanında, I. grup problemler için bulunan sonuçlar incelendiğinde, parçalama yöntemi sayısının iki olduğu örnekler için bulunan ortalama sapma değerlerinin, parçalama yöntemi sayısı bir olduğunda bulunan değerlere göre daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4. 9. I. grup problemler için farklı parçalama yöntemi sayılarına göre tb ile bulunan sonuçlar

Müşteri Sayısı	Parçalama Yöntemi Sayısı	Problem Sayısı	Her Bir Çalıştırmada Bulunan Ortalama Sapma Değerleri (%)			Tüm Çalıştırmaların Ortalama Sapması (%)
			1	2	3	
25	1	135	1,63	1,62	1,78	1,68
	2	135	1,29	1,48	1,33	1,37
50	1	135	0,89	1,09	0,93	0,97
	2	135	0,88	0,87	0,88	0,88
100	1	135	1,02	1,20	1,34	1,19
	2	134	1,11	1,06	1,34	1,17
250	1	55	1,54	1,50	1,73	1,59
	2	27	1,56	1,40	1,60	1,52
500	1	10	1,85	1,90	1,84	1,86

Çizelge 4. 10. II. grup problemler için farklı parçalama yöntemi sayılarına göre tb ile bulunan sonuçlar

Müşteri Sayısı	Parçalama Yöntemi Sayısı	Problem Sayısı	Her Bir Çalıştırmada Bulunan Ortalama Sapma Değerleri (%)			Tüm Çalıştırmaların Ortalama Sapması (%)
			1	2	3	
100	2	1	0,09	0,31	0,01	0,14
250	1	80	3,16	3,43	3,32	3,30
	2	108	3,22	3,09	3,19	3,17
500	1	125	5,95	6,12	6,11	6,06
	2	135	6,11	6,11	6,06	6,09

Bu çalışmada üretilen deneysel problemlerin birbirlerine göre bir farklılığı da ürün sayılarıdır. Her bir müşteri sayısı seviyesi için artan ürün sayıları için çözülen problemlerin ortalama sapma değerleri Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 11. I. grup problemler için farklı ürün sayılarına göre tb ile bulunan sonuçlar

Müşteri Sayısı	Ürün Sayısı	Problem Sayısı	Her Bir Çalıştırmada Bulunan Ortalama Sapma Değerleri (%)			Tüm Çalıştırmaların Ortalama Sapması (%)
			1	2	3	
25	2	90	2,74	2,93	2,89	2,85
	3	90	1,27	1,02	1,21	1,17
	5	90	0,37	0,70	0,56	0,55
50	2	90	1,50	1,64	1,45	1,53
	3	90	0,49	0,56	0,59	0,55
	5	90	0,67	0,73	0,67	0,69
100	2	90	1,57	1,72	1,90	1,73
	3	89	0,57	0,65	0,74	0,65
	5	90	1,05	1,02	1,37	1,15
250	2	61	1,47	1,26	1,55	1,43
	3	21	1,76	2,05	2,09	1,97
500	2	10	1,85	1,90	1,84	1,86

Çizelge 4. 12. II. grup problemler için farklı ürün sayılarına göre tb ile bulunan sonuçlar

Müşteri Sayısı	Ürün Sayısı	Problem Sayısı	Her Bir Çalıştırmada Bulunan Ortalama Sapma Değerleri (%)			Tüm Çalıştırmaların Ortalama Sapması (%)
			1	2	3	
100	3	1	0,09	0,31	0,01	0,14
250	2	29	2,34	1,92	2,18	2,15
	3	69	2,78	2,93	2,99	2,90
	5	90	3,79	3,90	3,79	3,82
500	2	80	4,68	4,94	4,85	4,82
	3	90	6,21	6,19	6,25	6,22
	5	90	7,05	7,08	7,03	7,05

Çizelge 4.11’de belirtilen sonuçlar dikkate alındığında, 25, 50 ve 100 müşterili örnekler için beklenenin aksine, ürün sayısı arttıkça çözümlerin ortalama sapma değerlerinin artmadığı görülmektedir. Bu durum, 250 ve 500 müşterili örneklerde ise beklendiği gibi gerçekleşmiştir ve ürün sayısı arttıkça bulunan sonuçların kalitesi düşmüştür. Buradan, 25, 50 ve 100 müşterili örnekler için ürün sayısındaki değişimlerin, TB kullanılarak bulunan sonuçlarla doğru orantılı olmadığı söylenebilir.

Çalışmada ele alınan deneysel problemlerin birbirlerine göre bir diğer farklılıkları da tasarlanan ağın tipidir. Yalnızca geri dönüşüm seçeneğinin ele alındığı (G), geri dönüşüm ve yeniden üretimin beraberce ele alındığı (G_Y) ve son olarak da geri dönüşüm, yeniden üretim ve zararlı atıkların işlenmesi seçeneklerinin tümünün dikkate alındığı (G_Y_Z) ağ tasarım tipleri için oluşturulmuş örnek problemlere TB kullanılarak bulunan sonuçların ortalama sapma değerleri, Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14’de gösterilmiştir. Burada, farklı ağ tipleri için bulunan sonuçlar diğer karşılaştırmalarda olduğu gibi müşteri sayıları baz alınarak gösterilmiştir.

Çizelge 4. 13. I. grup problemler için farklı ağ tasarım tiplerine göre tb ile bulunan sonuçlar

Müşteri Sayısı	Ağ Tipi	Problem Sayısı	Her Bir Çalıştırmada Bulunan Ortalama Sapma Değerleri (%)			Tüm Çalıştırmaların Ortalama Sapması (%)
			1	2	3	
25	G	90	1,44	1,41	1,22	1,36
	G Y	90	1,46	1,54	1,55	1,52
	G Y Z	90	1,49	1,70	1,90	1,70
50	G	90	0,64	0,79	0,82	0,75
	G Y	90	1,01	1,01	1,16	1,06
	G Y Z	90	1,00	1,14	0,74	0,96
100	G	90	0,94	0,77	1,04	0,92
	G Y	89	1,14	1,32	1,60	1,35
	G Y Z	90	1,12	1,30	1,38	1,27
250	G	29	1,45	1,30	1,27	1,34
	G Y	31	1,59	1,77	2,09	1,82
	G Y Z	22	1,61	1,26	1,67	1,51
500	G	3	0,28	0,11	0,16	0,18
	G Y	3	1,18	0,88	0,66	0,90
	G Y Z	4	3,54	4,00	4,00	3,85

Çizelge 4. 14. II. grup problemler için farklı ağ tasarım tiplerine göre tb ile bulunan sonuçlar

Müşteri Sayısı	Ağ Tipi	Problem Sayısı	Her Bir Çalıştırmada Bulunan Ortalama Sapma Değerleri (%)			Tüm Çalıştırmaların Ortalama Sapması (%)
			1	2	3	
100	G Y	1	0,09	0,31	0,01	0,14
250	G	61	3,27	3,34	3,42	3,34
	G Y	59	3,37	3,12	3,27	3,26
	G Y Z	68	2,98	3,24	3,08	3,10
500	G	87	6,56	6,63	6,63	6,61
	G Y	87	5,65	5,81	5,81	5,76
	G Y Z	86	5,88	5,91	5,81	5,86

Bu tez çalışmasında, üretilen deneysel problemlerin GAMS 22.5 yazılımı kullanılarak ve 7200 saniye çalışma sınırı konularak elde edilen sonuçlarına göre, 449 adet problem bu çalışma süresinde en iyi sonucu bulunarak çözülememiştir. Bu problemlerin, TB ile çözümü sonucu elde edilen ortalama sapma değerleri, Çizelge 4.15’de gösterilmiştir. Burada, değişen müşteri sayıları için o grupta kaç adet problemin çözülemediği ve bu problemlere TB ile bulunan çözümlerin ortalama sapma değerleri raporlanmıştır.

Çizelge 4.15 incelendiğinde, GAMS 22.5 yazılımı yardımıyla 7200 saniyede en iyi değer bulunamayan problemlere, TB’nin en fazla 1440 saniyede ve en fazla % 6,81’lik bir sapma göstererek sonuç verdiği görülmektedir. TB yöntemi kullanılarak tüm deneysel problemlerin çözümü sonucu elde edilen bazı sonuçlar, Ek-5’te gösterilmiştir.

Çizelge 4. 15. 7200 saniyenin altında en iyi sonucu bulunamayan problemlere TB ile bulunan sonuçlar

Müşteri Sayısı	Süre İçinde Sonuç Bulunamayan Örnek Sayısı	TB İle Çalıştırma Süresi (s.)	Her Bir Çalıştırmada Bulunan Ortalama Sapma Değerleri (%)		
			1	2	3
100	1	280	0,09	0,31	0,01
250	54	360	1,67	1,69	1,77
	61	520	3,16	3,21	3,28
	73	720	4,35	4,40	4,31
500	80	640	5,05	5,04	5,10
	90	960	6,12	6,39	6,25
	90	1440	6,81	6,80	6,79

Bu tez çalışmasında öne sürülen tersine lojistikte farklı ürün geri kazanım seçeneklerini beraberce değerlendiren çok ürünlü ağ tasarım probleminin çözümü amacıyla uyarlanan TB algoritması kullanılarak deneysel problemlerin çözümü sonucunda, bu yöntemin bu problem için kullanılabileceği görülmüştür. Uygulamada ve teoride, bu problem ve bu problemin çözümü için geliştirilen karma tamsayılı doğrusal matematiksel model kullanılarak büyük boyutlu problemlere çözüm

aranması durumunda, TB'nin etkin bir araç olarak başvurulabileceği görülmüştür. Bunun yanı sıra, bu çalışmada kullanılan TB yöntemi, özellikle hareket mekanizması ve başlangıç çözümünün seçimi aşamalarında literatürdeki örneklerinden farklı bir yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşımın, farklı ağ tasarım problemlerine de uyarlanabileceği düşünülmektedir.

5. SONUÇ

Faydalı ömürlerini tamamlamış ürünlerin müşterilerden geri alınıp, uygun geri kazanım seçenekleri kullanılarak bu ürünlerdeki değerin kazanılması süreci olarak ifade edilebilecek tersine lojistik, günümüzde yasal gereklilikler ve maliyet avantajları nedeniyle işletmelerin ve araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Etkin bir tersine lojistik sistemi için ürünlerin müşterilerden nasıl geri toplanacağı, hangi tesislerde nasıl işlemlerden geçeceği ve ulaştırma maliyetlerini en küçükmek için bu ürünlerin nasıl taşınacağı sorularının yanıtı olan etkin bir tersine lojistik ağı kurulmalıdır.

Tersine lojistik literatüründe, ağ tasarım problemleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu çalışmalarda çoğunlukla belli bir sektör veya belli ürün grupları için geri dönüşüm veya yeniden üretim ağlarının tasarlanmasının dikkate alındığı görülmektedir. Dolayısı ile farklı ürün gruplarının veya farklı ağ yapılarının dikkate alındığı genel bir yaklaşıma ihtiyaç olduğu düşünülmüştür. Bu bağlamda, bu çalışmada ortaya konulan problem yapısı ile literatürdeki bu eksikliğin doldurulması amaçlanmıştır. Geri dönüşüm, yeniden üretim ve zararlı atıkların işlenmesi seçeneklerinin aynı ağ tasarımında dikkate alınması, ürünler için birden fazla parçalama yönteminin belirlenebilmesi, çok sayıda geri dönüşebilir malzeme tipinin ve yeniden üretilebilir parça tipinin belirlenebilmesi, geri dönüşüm tesislerinin teknolojik yapılarına göre farklılaştırılması özellikleri nedeniyle, bu çalışmada ele alınan problem ve bu problemin çözümüne yönelik olarak geliştirilen karma tamsayılı matematiksel model ve tavlama benzetimi temelli sezgisel yaklaşım, karar vericiye ağ tasarımı konusunda esneklik sağlamaktadır.

Çok ürünlü bir tersine lojistik sistemi için, geri dönüşüm, yeniden üretim ve geri kazanım sürecinde ortaya çıkan zararlı atıkların işlenmesi seçeneklerinin beraberce ele alındığı bir tersine lojistik ağ tasarım probleminin incelendiği bu çalışmada, etkin bir ağ tasarımı için öncelikle sistem ve sistemin bileşenleri tanıtılmıştır. Çalışmada ele alınan problemin bazı özellikleri, literatürde daha önceden yapılmış çalışmalarda dikkate alınmamıştır. Özellikle, bir ürünün farklı parçalama yöntemleriyle

parçalanabilmesi ve her farklı parçalama işlemi sonucu farklı oranlarda geri kazanım sağlanması, geri dönüşebilir malzeme tiplerinin tanımlanması ve geri dönüşüm tesislerinin yalnızca belli malzeme tiplerini işleyebilmesi, yeniden üretilebilir parçaların herhangi bir üretim tesisine değil, yalnızca o parçaya ihtiyaç duyan üretim tesisine gönderilebilmesi kısıtı, bu çalışmada ele alınan problemi literatürde daha önceden yapılmış çalışmalardan farklı kılmaktadır.

Bu tez çalışmasında tanımlanan tersine lojistikte ağ tasarımı probleminin çözülmesi amacıyla, karma tamsayılı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modelin en büyük avantajı, karar vericiye sunduğu esnekliktir. Bu esneklik, ele alınan tersine lojistik sisteminde hangi geri kazanım seçeneklerinin dikkate alınacağıdır. Geliştirilen matematiksel model kullanılarak, sadece geri dönüşüm veya sadece yeniden üretim seçeneklerini dikkate alan bir sistem için etkin bir ağ kurulabileceği gibi, geri dönüşüm, tersine lojistik ve zararlı atıkların işlenmesi seçeneklerinin tümü veya kombinasyonları için de etkin bir tersine lojistik ağı kurulabilmektedir.

Çalışmada ele alınan problemin çözümü amacıyla geliştirilen matematiksel modelin geçerliği ve problemleri çözüm süresinin analizi amacıyla, farklı parametre boyutlarında ve farklı geri kazanım seçenekleri için bir deneysel çalışma yapılmıştır. 1350 adet problemin, geliştirilen bir sistematik yardımıyla üretildiği deney tasarımı sonucu elde edilen problemler GAMS 22.5 yazılımının Cplex çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Yapılan çözümlerde, kabul edilebilir bir çözüm süresi olarak 7200 saniye seçilmiştir.

Deneysel problemlerin çözümü sonucu, elde edilen çözüm süreleri incelendiğinde, tüm problemlerin 449 tanesinin belirlenen çözüm süresi üst sınırı içinde çözülemediği görülmüştür. Çözülen problemlerin müşteri sayısı, parçalama yöntemi sayısı, ürün sayısı ve aday toplama tesisi sayısı arttıkça çözüm süresinin uzadığı görülmüştür. Her bir müşteri sayısı seviyesi için üretilen 270 ayrı problem dikkate alındığında, müşteri sayısı 100 olduğunda yalnızca bir tanesi verilen süre içinde çözülemezken, müşteri sayısı 250 olduğunda 188 tane ve müşteri sayısı 500

olduğunda da 260 tanesinin belirlenen çalışma süresinde çözülemediği görülmüştür. Ürün sayısı, parçalama yöntemi sayısı ve aday toplama tesisi sayıları arttıkça da benzer şekilde çözülebilen problem sayısının azaldığı ve çözülen problemlerin de ortalama çözüm sürelerinin arttığı görülmüştür. Farklı ağ tiplerine göre ise ağ tipindeki değişimin çözüm süreleri ve çözülebilen problem sayısına etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Çözülen problemlerin çözüm süreleri incelendiğinde, müşteri sayısı 500, aday toplama tesisi sayısı 120 ve ürün sayısı 5'ten büyük problemlerin çözümünün çok uzun zaman alacağı sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen matematiksel model kullanılarak gerek uygulamada ve gerekse de teorik çalışmalarda, daha büyük boyutlu problemlerin kabul edilebilir süreler içinde çözülebilmesi amacıyla tavlama benzetimi temelli bir sezgisel yaklaşım geliştirilmiştir. Tavlama benzetiminin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için probleme özgü bir başlangıç çözümü belirleme yöntemi ve komşu çözümler içinde yeni çözümler üretebilmek için bir hareket mekanizması geliştirilmiştir. Problem yapısına en uygun tavlama benzetimi parametrelerinin belirlenmesi için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla, farklı müşteri sayısı, ürün sayısı, parçalama yöntemi sayısı ve ağ tipine göre 36 örnek problem seçilmiştir ve bu problemlerin her biri 16 farklı parametre kümesi için dörder kez çözülerek, en uygun parametre kümesi belirlenmiştir. Problemin yapısına, karar değişkenlerine ve parametrelerine uygun bir tavlama benzetimi temelli çözüm yaklaşımı geliştirilerek, deneysel çalışma için üretilen problemler bu algoritma yardımıyla çözülmüştür. Problemin, aday toplama tesislerinin açılması ile ilgili 0-1 karar değişkenlerinin belirlenmesinde tavlama benzetimi algoritması kullanılmıştır ve buradan elde edilen açılma kararları neticesinde ortaya çıkan aktarmalı ulaştırma problemi yine GAMS 22.5 yazılımının Cplex çözücüsü ile bulunmuştur. Problemlerin tavlama benzetimi temelli sezgisel yaklaşım ile çözülmesiyle elde edilen sonuçlarla, aynı problemlerin GAMS 22.5 yazılımı ile çözümüyle elde edilen sonuçları kıyaslandığında, tüm problemlerin % 2,45 oranında bir ortalama sapma ile çözüldüğü görülmüştür. Ancak, GAMS 22.5 yazılımı ile 7200 saniyede çözülemeyen problemlere, en fazla 1440 saniye çalıştırma ile ortalama % 6,81 oranında yaklaşık bir sonuç bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, tavlama benzetiminin, bu çalışmada ele alınan tersine lojistikte ağ tasarımı problemi

için kısa çözüm sürelerinde cesaret verici sonuçlar üretebildiğini göstermektedir. Dolayısı ile, tavlama benzetimi temelli çözüm yaklaşımının bu çalışmada ele alınan problemin, müşteri sayısı, ürün sayısı ve aday toplama tesisi bakımından daha büyük örneklerinin çözümünde kullanılabileceğı sonucuna varılmıştır. Bunun yanı sıra, bu çalışmada geliştirilen sistematığın, literatürde ele alınan farklı tersine lojistikte ağı tasarımı problemlerinin çözümünde de kullanılabileceğı düşünölmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında, gelecekte tersine lojistikte ağı tasarımı konusunda incelenebilecek çalışma konuları değeriendirilmiştir. Buna göre, problem parametrelerindeki belirsizliklerin dikkate alınabileceğı ve bu konuda olasılıklı modellemeden faydalanılabileceğı; problemin birbiriyle çelişen birden fazla amaç belirlenerek geliştirilebileceğı; farklı ürün grupları üzerinde gerçek uygulamaların yapılabileceğı düşünölmektedir.

KAYNAKLAR

- Achillas, C., Vlachokostas, C., Moussiopoulos, N., Banias, G., “Decision support system for the optimal location of electrical and electronic waste treatment plants: A case study in Greece”, *Waste management*, 30: 870-879 (2010).
- Ahluwalia, P. K., Nema, A. K., "Multi-objective reverse logistics model for integrated computer waste management", *Waste Management and Research*, 24: 514-527 (2006).
- Amiri, A., “Designing a distribution network in supply chain system: Formulation and efficient solution procedure”, *European Journal of Operational Research*, 171: 567-576 (2006).
- Autry, C.W., “Formalization of reverse logistics programs: a strategy for managing liberalized returns”, *Industrial Marketing Management*, 34: 749–757 (2005).
- Beamon, B.M., Fernandes, C., “Supply-chain network configuration for product recovery”, *Production Planning and Control*, 13: 270–281 (2004).
- Biehl, M., Prater, E., Realff, M. J., "Assessing performance and uncertainty in developing carpet reverse logistics systems", *Computers and Operations Research*, 34: 443-463 (2007).
- Bufardi, A., Gheorghe, R., Kiritsis, D., Xirouchakis, P., “Multicriteria decision-aid approach for product end-of-life alternative selection”, *International Journal of Production Research*, 42: 3139–3154 (2004).
- Chan, H. K., “A pro-active and collaborative approach to reverse logistics - a case study”, *Production Planning and Control*, 18: 350 – 360 (2007).
- Cruz-Rivera, R., Ertel, J., “Reverse logistics network design fort he collection of End-of-Life Vehicles in Mexico”, *European Journal of Operational Research*, 196: 930-939 (2009).
- de Brito, M., Dekker, R., “A framework for reverse logistics. In Reverse Logistics. Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains”, *Springer-Verlag*, 3–27 (2004).
- de Brito, M., Dekker, R., “Modelling products return in inventory control: exploring the validity of general assumptions”, *International Journal of Production Economics*, 81–82: 225–241 (2003).
- Demirel, N. O., Gökçen, H., "A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , 39: 1197-1206 (2007).

- Demirel, N. Ö., Gökçen, H., “Geri Kazanımlı İmalat Sistemleri İçin Lojistik Ağı Tasarımı: Literatür Araştırması”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 23: 903-912 (2008).
- Dethloff, J., “Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up”, *OR Spectrum*, 23: 79–96 (2001).
- Dowlatshahi, S., “A strategic framework for the design and implementation of remanufacturing operations in reverse logistics”, *International Journal of Production Research*, 43: 3455–3480 (2005).
- Dowlatshahi, S., “Developing a theory of reverse logistics”, *Interfaces*, 30(3): 143-155 (2000).
- Du, F., Evans, G. W., “A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service”, *Computers and Operations Research*, 35: 2617-2634 (2008).
- Easwaran, G., Üster, H., “A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions”, *IIE Transactions*, 42: 779-792 (2010).
- Ferrer, G., “On the widget remanufacturing operation”, *European Journal of Operational Research*, 135: 373–393 (2001).
- Figueiredo, J. N., Mayerle, S. F., “Designing minimum-cost recycling collection networks with required throughput”, *Transportation Research Part E*, 44: 731-752 (2008).
- Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Van Wassenhove, L.N., “The impact of product recovery on logistics network”, *Production and Operations Management*, 10: 156–173 (2001).
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., Van der Laan, E.A., Van Nunen, J.A.E.E., Van Wassenhove, L.N., “Quantitative models for reverse logistics: a review”, *European Journal of Operational Research*, 103: 1–13 (1997).
- Fleischmann, M., Krikke, H.R., Dekker, R., Flapper, S.P.D., “A characterisation of logistics networks for product recovery”, *Omega*, 28: 653–666 (2000).
- Gonzalez-Torre, P.L., Adenso-Díaz, B., Artiba, H., “Environmental and reverse logistics policies in European bottling and packaging firms”, *International Journal of Production Economics*, 88: 95–104 (2004).
- Guide Jr, V.D.R., “Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs”, *Journal of Operations Management*, 18: 467–483 (2000).

- Guide Jr, V.D.R., Jayaraman, V., "Product acquisition management: current industry practice and proposed framework", *International Journal of Production Research*, 38: 3779–3808 (2000).
- Guide Jr, V.D.R., Jayaraman, V., Linton, J.D., "Building contingency planning for closedloop supply chains with product recovery", *Journal of Operations Management*, 21: 259–279 (2003).
- Guide Jr, V.D.R., Souza, G.C., van der Laan, E., "Performance of static priority rules for shared facilities in a remanufacturing shop with disassembly and reassembly", *European Journal of Operational Research*, 164: 341–353 (2005).
- Gungor, A., Gupta, S.M., "Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: A survey", *Computers and Industrial Engineering*, 36:811-853 (1999).
- Hicks, C., Heidrich, O., McGovern, T., Donnelly, T., "A functional model of supply chains and waste", *International Journal of Production Economics*, 89: 165–174 (2004).
- Jarayaman, V., Patterson, R.A., Rolland, E., "The design of reverse distribution networks: models and solution procedures", *European Journal of Operational Research*, 150: 128–149 (2003).
- Jayaraman, V., Guide Jr, V.D.R., Srivastava, R., "A closed-loop logistics model for remanufacturing", *Journal of Operational Research Society*, 50: 497–508 (1999).
- Johnson, M.R., Wang, M.H., "Economical evaluation of disassembly operations for recycling, remanufacturing and reuse", *International Journal of Production Research*, 36: 3227–3252 (1998).
- Kara, S., Rugrungruang, F., Kaebernick, H., "Simulation modelling of reverse logistics Networks", *International Journal of Production Economics*, 106: 61-69 (2007).
- Kim, H., Yang, J., Lee, K., "Vehicle routing in reverse logistics for recycling end-of-life consumer electronic goods in South Korea", *Transportation Research Part D*, 14: 291-299 (2009).
- Kim, K., Song, I., Kim, J., Jeong B., "Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment", *Computers and Industrial Engineering*, 51: 279-287 (2006).
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Veechi, M.P., "Optimization by simulated annealing", *Science*, 220, 671-679 (1983).
- Krikke, H.R., Van Harten, A., Schuur, P.C., "Business case Océ' : reverse logistic network re-design for copiers", *OR Spectrum*, 21: 381–409 (1999a).

Krikke, H.R., Van Harten, A., Schuur, P.C., “Business case Roteb: recovery strategies for monitors”, *Computers and Industrial Engineering*, 36: 739–757 (1999b).

Kumar, S., Putnam, V., “Cradle to cradle: Reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors”, *International Journal of Production Economics*, 115: 305–315 (2008).

Le Blanc, H.M., Fleuren, H.A., Krikke, H.R., “Redesign of a recycling system for LPG-tanks”, *OR Spectrum*, 26: 286–304 (2004).

Louwers D, Kip BJ, Peters E, Souren F, Flapper SDP, “A facility location allocation model for re-using carpet materials”, *Computers and Industrial Engineering*, 36:1-15 (1999).

Lu, Z., Bostel, N., “A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities”, *Computers and Operations Research*, 34, 299-323 (2007).

Mansour, S., Zarei, M., “A multi-period reverse logistics optimisation model for end-of-life vehicles recovery based on EU directive”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21: 764-777 (2008).

Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., Teller, E., “Equation of state calculations by fast computing machines”, *Journal of Chemical Physics*, 21 1087-1092 (1953).

Min, H., Ko, H. J., Ko, C. S., "A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns", *Omega*, 34: 56-69 (2006).

Nagel, C. and Meyer, P., “Caught between ecology and economy: end-of-life aspects of environmentally conscious manufacturing”, *Computers and Industrial Engineering*, 36: 781–792 (1999).

Nunes, K. R. A., Mahler, C. F., Valle, R. A., “Reverse logistics in the Brazilian construction industry”, *Journal of Environmental Management*, 90: 3717-3720 (2009).

Okumura, S., Morikuni, T., Okino, N., “Environmental effects of physical life span of a reusable unit following functional and physical failures in a remanufacturing system” *International Journal of Production Research*, 41: 3667–3687 (2003).

Patel, G.S., “A stochastic production cost model for remanufacturing systems”, *University of Texas-Pan American*, 1-16 (2006).

Pishvaei, M. S., Jolai, F., Razmi, J., “A stochastic model for integrated forward/reverse logistics network design”, *Journal of Manufacturing Systems*, 28: 107-114 (2009).

- Pokharel, S., Mutha, A., "Perspectives in reverse logistics: A review", *Resources, Conservation and Recycling*, 53: 175-182 (2009).
- Ravi, V., Shankar, R., "Analysis of interactions among the barriers of reverse logistics", *Technological Forecasting Society*, 72: 1011-1029 (2005).
- Richey, R.G., Chen, H., Genchev, S.E., Daugherty, P.J., "Developing effective reverse logistics programs", *Industrial Marketing Management*, 34: 830-840 (2005).
- Rubio, S., Chamorro, A., Miranda, F. J., "Characteristics of the research on reverse logistics (1995-2005)", *International Journal of Production Research*, 46(4): 1099 – 1120 (2008).
- Salema, M. I. G., Barbosa-Pavoa, A. P., Novais, A. Q., "An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty", *European Journal of Operational Research*, 179: 1063-1077 (2007).
- Sasikumar, P., Kannan, G., Haq, A. N., "A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery – A case of truck tire remanufacturing", *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 49: 1223-1234 (2010).
- Savaskan, R.C., Bhattacharya, S., Van Wassenhove, L.N., "Closed-loop supply chain models with product remanufacturing", *Management Science*, 50: 239-252 (2004).
- Schneider, J. J., Kirkpatrick, S., "Stochastic Optimization", *Springer*, 79-88 (2006).
- Schultmann, F., Zumkeller, M., Rentz, O., "Modelling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from automotive industry", *European Journal of Operational Research*, 171: 1033-1050 (2006).
- Serrato, M. A., Ryan, S. M., Gaytan, J., "A Markov decision model to evaluate outsourcing in reverse logistics", *International Journal of Production Research*, 45: 4289-4315 (2007).
- Sheu, J. B., "Green supply chain management, reverse logistics and nuclear power generation", *Transportation Research Part E*, 44: 19-46 (2008).
- Sheu, J. B., "A coordinated reverse logistics system for regional management of multi-source hazardous wastes", *Computers and Operations Research*, 34, 1442-1462 (2007).
- Sheu, J.B., Chou, Y.H., Hu, C.C., "An integrated logistics operational model for green-supply chain management", *Transportation Research Part E*, 41: 287-313 (2005).
- Shih, L., "Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan", *Resources, Conservation and Recycling*, 32: 55-72 (2001).

Sodhi, M.S., Reimer, B., “Models for recycling electronics end-of-life products” *OR Spectrum*, 23: 97–115 (2001).

Srivastava, S. K., "Network design for reverse logistics", *Omega*, 36: 535-548 (2008).

Thierry, M., Salomon, M., Nunen, J., Wassenhove, L., “Strategic Issues in Product Recovery Management”, *California Management Review*, 37(2): 114-135 (1995).

Van Laarhoven, P. J. M., Aarts, E. H. L., “Simulated Annealing: Theory and Applications”, *Kluwer Academic Publishers*, 7-157(2010).

Wadhwa, S., Madaan, J., Chan, F. T. S., “Flexible decision modelling of reverse logistics system: A value adding MCDM approach for alternative selection”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25: 460-469 (2009).

Weeks, K., Gao, H., Alidaee, B., Rana, D. S., “An empirical study of impacts of production mix, product route efficiencies on operations performance and profitability: a reverse logistics approach”, *International Journal of Production Research*, 48: 1087–1104 (2010).

EKLER

EK-1 Deneyisel problem parametrelerinin belirlenme yöntemleri

l = Toplama tesisi sayısı, top_g = toplam geri dönen ürün sayısı, C_j^l : j tipindeki toplama tesislerinin toplam kapasitesi $cap = \frac{1,5 * top_g}{l}$ $C_1^l = 0,5 * cap$, $C_2^l = 0,75 * cap$, $C_3^l = cap$, $C_4^l = 1,25 * cap$, $C_5^l = 1,5 * cap$.
$O_{l,j}$: l noktasında j tipinde bir toplama tesisi açmanın sabit maliyeti olsun, $O_{l,3}$ 'ün merkez noktası olan $[50,50]$ 'ye uzaklığı d olsun; $O_{l,3}$ 'ün açılma maliyeti $500*d$; $O_{l,1} = 0,6 * (500 * d)$ $O_{l,2} = 0,85 * (500 * d)$ $O_{l,4} = 1,15 * (500 * d)$ $O_{l,5} = 1,35 * (500 * d)$
$P_{l,s,d}$: d parçalama yöntemine göre s ürününü l toplama tesisinde işlemenin maliyeti ; Unif $[0,2 , 0,8]$
$\delta_{l,s,d}$: d parçalama yöntemine göre s ürününün l toplama tesisinde işlenirken kullanılan kapasite; Unif $[1 , 5]$
$N_{r,m} = \begin{cases} 1 & \text{Eğer m malzeme tipi r geri dönüşüm tesisinde işlenebilirse} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$ $N_{r,m} = \begin{cases} 1 & \%60 \text{ olasılıkla} \\ 0 & \%40 \text{ olasılıkla} \end{cases}$
C_r^u : r geri dönüşüm tesisine toplam nakledilebilecek geri dönüştürülebilir malzeme miktarı; top_g = Sistemde toplam geri dönen ürün sayısı; r : Geri dönüşüm tesisleri; $C_r^u = \frac{top_g * 1,15}{r}$

EK-1 (Devam) Deneysel problem parametrelerinin belirlenme yöntemleri

W_h : Birim h zararlı atığının işlenme maliyeti; $Unif [0,4 , 0,8]$
C_h^w : h zararlı atık işleme tesisinde kullanılabilir toplam kapasite; top_g = Sistemde toplam geri dönen ürün sayısı; h : Zararlı atık işleme tesisleri sayısı; $C_h^w = \frac{top_g * 1,15}{h}$
F : Birim ağırlığın birim mesafeye taşınması maliyeti; $F = 0,008$
D : Birim ağırlık için katı atık maliyeti; $D = 1,2$
j : toplama tesisi tipleri; $j=5$

EK-2 Örnek gams kodlaması

```

scalars
F /0.008/
D1 /1.2/
M1 /10000000/
;
Binary Variables
YC (l,j)
;
Positive Variables
*XKC(t,l,s)
XCP(l,i,g)
XCU(l,r,m)
XCW(l,h)
;
Integer Variables
Z(l,s,d)
XKC(t,l,s)
A (l,s)
;
variable
z1
z_opening
z_transport
z_operations
z_income
;
equations
obj1
obj2
obj3
obj4
obj
const1 (l)
const2 (s)
const3 (l)
const4 (t,s)
const5 (s,d)
const6 (l,s)
const7 (i,g)
const8 (l,g)
const9 (l,m)
const10 (r,m)
const11 (l)
const12 (h)
const13 (l)

```

EK-2 (Devam) Örnek gams kodlaması

```

const14 (r)
;
Z.up(l,s,d)=1000000;
XKC.up(t,l,s)=1000000;
A.up(l,s)=1000000;
obj1 .. z_opening =e= sum((l,j), YC(l,j)*O(l,j));
obj2 .. z_operations =e= D1*sum(s,Q(s)* sum(l,A(l,s)))+
      D1* sum((s,d),Lambda4(s,d)*sum(l,Z(l,s,d)))+
      sum((l,s,d),Z(l,s,d)*P(l,s,d))+
      sum(h, W(h)*sum((l),XCW(l,h)));
obj3 .. z_transport =e= F*sum((t,l,s),Q(s)*L12(t,l)*XKC(t,l,s))+
      F*sum((l,i),L23(l,i)*sum(g,QI(g)*XCP(l,i,g)))+
      F*sum((l,r,m),L24(l,r)*XCU(l,r,m))+
      F*sum((l,h),L25(l,h)*XCW(l,h));
obj4 .. z_income =e=
sum(m,fu(m)*sum((l,r),XCU(l,r,m)))+sum(g,fi(g)*sum((l,i),XCP(l,i,g)));
obj .. z1 =e= z_opening + z_operations + z_transport - z_income;
const1 (l) .. sum(j,YC(l,j)) =l= 1;
const2 (s) .. sum((l,d),Z(l,s,d)) =g= B(s)*sum(t,R1(t,s));
const3(l) .. sum((t,s),XKC(t,l,s)) =l= sum(j,YC(l,j))*M1;
const4 (t,s) .. sum((l),XKC(t,l,s)) =e= R1(t,s);
const5 (s,d) .. sum(l,Z(l,s,d)) =l= K(s,d) * M1;
const6 (l,s) .. A(l,s) + sum(d,Z(l,s,d)) =e= sum((t),XKC(t,l,s));
const7 (i,g) .. sum(l,XCP(l,i,g)) =l= E(i,g)*M1;
const8 (l,g) .. sum((i),XCP(l,i,g)) =e= sum((s,d),Lambda1(s,d,g)*Z(l,s,d));
const9 (l,m) .. sum((s,d), Lambda2(s,d,m) * Z(l,s,d)) =e= sum((r),XCU(l,r,m));
const10 (r,m) .. sum((l), XCU(l,r,m)) =l= N(r,m) * M1;
const11 (l) .. sum((s,d), Lambda3(s,d) * Z(l,s,d)) =e= sum(h,XCW(l,h));
const12 (h) .. sum((l),XCW(l,h)) =l= Cw(h);
const13 (l) .. sum ((s,d), Z(l,s,d)*Gamma(l,s,d)) =l= sum(j,YC(l,j)*Cl(j));
const14 (r) .. sum((l,m), XCU(l,r,m)) =l= Cu(r);
model my1 /all/;
my1.optcr=0.0;
my1.reslim=7200;
my1.iterlim=1e9;
solve my1 using mip minimizing z1 ;
file outfile /c:\test\sonuclar\1_RCY_2_25_8_1.txt/;
put outfile;
put z1.l; put /;
put z_opening.l; put /;
put z_operations.l; put /;
put z_transport.l; put /;
put z_income.l; put /;
put my1.modelstat; put /;
put my1.resusd; put /;

```

EK-2 (Devam) Örnek gams kodlaması

```

put '***YC(l,j)'; put /; loop ((l,j)$YC.l(l,j), put l.tl j.tl put /;);
put '***XKC(t,l,s)'; put /; loop((t,l,s)$XKC.l(t,l,s), put t.tl l.tl s.tl XKC.l(t,l,s); put
/;);
put '***XCP(l,i,g)'; put /; loop((l,i,g)$XCP.l(l,i,g), put l.tl i.tl g.tl XCP.l(l,i,g); put
/;);
put '***XCU(l,r,m)'; put /; loop((l,r,m)$XCU.l(l,r,m), put l.tl r.tl m.tl XCU.l(l,r,m);
put /;);
put '***XCW(l,h)'; put /; loop((l,h)$XCW.l(l,h), put l.tl h.tl XCW.l(l,h); put /;);
*put '***H1(t,s)'; put /; loop ((t,s)$H1.l(t,s), put t.tl s.tl H1.l(t,s); put /;);
put '***A(l,s)'; put /; loop ((l,s)$A.l(l,s), put l.tl s.tl A.l(l,s); put /;);
put '***Z(l,s,d)'; put /; loop((l,s,d)$Z.l(l,s,d), put l.tl s.tl d.tl Z.l(l,s,d); put /;);

```

EK-3 Problemlerin gams ile çözülmesi sonucu elde edilen bazı sonuçlar

Parçalama Yöntemi Sayısı	Problem Tipi	Ürün Sayısı	Müşteri Sayısı	Aday Toplama Tesisi Sayısı	Örnek No	Çözüm Süresi (s.)	Bulunan En iyi Sonuç
1	G	3	250	45	2	114,05	1334418,57
1	G	3	250	65	2	7202,06	1527898,04
1	G	3	250	90	2	7201,67	1702214,33
1	G	5	250	45	2	7202,92	2416873,41
1	G	5	250	65	2	7204,59	2760490,16
1	G	5	250	90	2	7202,39	2925992,33
1	G_Y	3	250	45	2	1570,42	1253530,04
1	G_Y	3	250	65	2	7202,98	1773093,23
1	G_Y	3	250	90	2	7202,11	1676549,21
1	G_Y	5	250	45	2	7202,69	2066265,29
1	G_Y	5	250	65	2	7201,88	2452579,79
1	G_Y	5	250	90	2	7202,92	2823660,38
1	G_Y_Z	3	250	45	2	7202,28	1106231,53
1	G_Y_Z	3	250	65	2	7201,67	1296470,21
1	G_Y_Z	3	250	90	2	7202,50	1737796,21
1	G_Y_Z	5	250	45	2	7202,55	875369,32
1	G_Y_Z	5	250	65	2	7202,44	1256900,97
1	G_Y_Z	5	250	90	2	7202,77	1452399,57
2	G	3	250	45	2	7202,84	1381514,86
2	G	3	250	65	2	7201,89	1677385,50
2	G	3	250	90	2	7203,28	1868535,13
2	G	5	250	45	2	7204,14	929143,76
2	G	5	250	65	2	7202,86	1380202,06
2	G	5	250	90	2	7203,44	1679029,41
2	G_Y	3	250	45	2	7201,73	807691,66
2	G_Y	3	250	65	2	7202,80	933654,52
2	G_Y	3	250	90	2	7203,08	1385550,57
2	G_Y	5	250	45	2	7203,23	-234327,97
2	G_Y	5	250	65	2	7201,91	-58282,81
2	G_Y	5	250	90	2	7204,75	68612,45
2	G_Y_Z	3	250	45	2	7201,66	857701,50
2	G_Y_Z	3	250	65	2	7201,00	1139233,95
2	G_Y_Z	3	250	90	2	7202,06	1255730,19
2	G_Y_Z	5	250	45	2	7200,81	726479,32
2	G_Y_Z	5	250	65	2	7202,73	1133519,71
2	G_Y_Z	5	250	90	2	7202,64	1708640,42

EK-4 Parametre en iyilemesi için yapılan bazı çözümlerin sonuçları

Problem	T	t	M	Durdurma	En iyi Sonuç	1. Çalıştırma	2. Çalıştırma	3. Çalıştırma	4. Çalıştırma
1 G Y Z 5 100 35 4	1	1	1	1	811185,87	812553,25	817661,72	811072,28	813545,22
1 G Y Z 5 100 35 4	1	1	1	2	811185,87	816967,86	811281,97	812553,25	813545,22
1 G Y Z 5 100 35 4	1	1	2	1	811185,87	812830,43	811072,28	812642,78	812614,82
1 G Y Z 5 100 35 4	1	1	2	2	811185,87	811883,29	811281,97	811072,28	811072,28
1 G Y Z 5 100 35 4	1	2	1	1	811185,87	815794,90	817607,54	811281,97	812553,25
1 G Y Z 5 100 35 4	1	2	1	2	811185,87	812553,25	811281,97	814874,49	811281,97
1 G Y Z 5 100 35 4	1	2	2	1	811185,87	812322,23	812363,19	811802,17	812553,25
1 G Y Z 5 100 35 4	1	2	2	2	811185,87	812637,08	814681,54	811072,28	814009,19
1 G Y Z 5 100 35 4	2	1	1	1	811185,87	811802,17	821354,05	815376,61	812830,43
1 G Y Z 5 100 35 4	2	1	1	2	811185,87	816024,39	822585,16	812477,74	811281,97
1 G Y Z 5 100 35 4	2	1	2	1	811185,87	813551,04	812637,08	816024,39	811281,97
1 G Y Z 5 100 35 4	2	1	2	2	811185,87	811281,97	812553,25	811281,97	814464,44
1 G Y Z 5 100 35 4	2	2	1	1	811185,87	817975,87	812553,25	814009,19	815066,01
1 G Y Z 5 100 35 4	2	2	1	2	811185,87	811072,28	811281,97	815409,58	811072,28
1 G Y Z 5 100 35 4	2	2	2	1	811185,87	812553,25	811778,78	812553,25	812553,25
1 G Y Z 5 100 35 4	2	2	2	2	811185,87	811901,78	812637,08	812553,25	812553,25
2 G Y 3 100 35 4	1	1	1	1	595574,67	595750,28	595967,74	596276,67	596330,21
2 G Y 3 100 35 4	1	1	1	2	595574,67	595750,28	595750,28	595750,28	595750,28
2 G Y 3 100 35 4	1	1	2	1	595574,67	595812,90	596923,80	595750,28	595812,90
2 G Y 3 100 35 4	1	1	2	2	595574,67	595750,28	595750,28	595750,28	595750,28
2 G Y 3 100 35 4	1	2	1	1	595574,67	598016,47	596546,64	595967,74	596690,58
2 G Y 3 100 35 4	1	2	1	2	595574,67	596113,84	595812,90	596113,84	596935,57
2 G Y 3 100 35 4	1	2	2	1	595574,67	595750,28	595750,28	595750,28	595750,28
2 G Y 3 100 35 4	1	2	2	2	595574,67	595750,28	595750,28	595750,28	595750,28
2 G Y 3 100 35 4	2	1	1	1	595574,67	595967,74	595750,28	595750,28	596276,67
2 G Y 3 100 35 4	2	1	1	2	595574,67	595750,28	596356,02	595750,28	595750,28
2 G Y 3 100 35 4	2	1	2	1	595574,67	596330,21	595750,28	595750,28	595750,28
2 G Y 3 100 35 4	2	1	2	2	595574,67	595750,28	595750,28	595750,28	595750,28
2 G Y 3 100 35 4	2	2	1	1	595574,67	596892,98	597914,46	595750,28	596113,84
2 G Y 3 100 35 4	2	2	1	2	595574,67	596113,84	595812,90	596113,84	596003,67
2 G Y 3 100 35 4	2	2	2	1	595574,67	595750,28	595812,90	595750,28	596330,21
2 G Y 3 100 35 4	2	2	2	2	595574,67	595750,28	595812,90	595812,90	595750,28

EK-5 Bazı problemlerin tb ile çözümüyle elde edilen sonuçlar

Problem	I. Çalıştırma	II. Çalıştırma	III. Çalıştırma
1_G_2_100_20_1	632078,24	632078,24	632078,24
1_G_2_100_20_2	678591,10	677681,40	678591,10
1_G_2_100_20_3	677054,03	677516,25	688560,63
1_G_2_100_20_4	646563,43	642691,37	642691,37
1_G_2_100_20_5	585934,45	585934,45	586155,53
1_G_2_100_35_1	763837,41	758909,50	755126,12
1_G_2_100_35_2	756633,37	755308,84	756368,19
1_G_2_100_35_3	820363,23	819620,72	822593,54
1_G_2_100_35_4	770064,32	776057,32	775757,03
1_G_2_100_35_5	768967,35	754325,25	761446,80
1_G_2_100_45_1	848075,21	851043,07	859755,43
1_G_2_100_45_2	883752,84	886253,75	890678,02
1_G_2_100_45_3	779109,35	763122,39	784523,46
1_G_2_100_45_4	759953,52	748106,55	747302,05
1_G_2_100_45_5	827582,87	817668,47	816784,21
1_G_2_250_45_1	1487524,33	1487524,33	1487524,33
1_G_2_250_45_2	1502753,16	1502860,14	1502860,14
1_G_2_250_45_3	1388089,48	1388089,48	1388089,48
1_G_2_250_45_4	1416111,28	1420734,01	1415591,02
1_G_2_250_45_5	1432907,52	1432907,52	1434218,02
1_G_2_250_65_1	1615932,67	1613582,44	1613789,97
1_G_2_250_65_2	1546837,32	1546339,95	1541770,87
1_G_2_250_65_3	1669054,19	1661462,09	1669904,69
1_G_2_250_65_4	1480454,43	1490045,65	1479554,63
1_G_2_250_65_5	1675096,19	1657200,63	1659057,49
1_G_2_250_90_1	1699445,38	1698158,53	1701918,83
1_G_2_250_90_2	1823340,24	1821717,40	1814399,83
1_G_2_250_90_3	1789090,38	1785425,49	1793225,83
1_G_2_250_90_4	1750251,58	1742612,21	1748873,64
1_G_2_250_90_5	1878704,74	1884988,11	1870149,66
1_G_2_500_80_1	3062898,34	3067477,85	3062601,40
1_G_2_500_80_2	2965888,05	2956828,95	2952338,79
1_G_2_500_80_3	3028861,51	3030415,01	3028939,79
1_G_2_500_80_4	2930912,01	2925385,18	2934437,94
1_G_2_500_80_5	2707775,93	2708231,87	2707775,93
1_G_2_500_120_1	3183648,30	3204118,71	3184612,50
1_G_2_500_120_2	3118489,75	3120948,26	3122268,00
1_G_2_500_120_3	3096619,92	3102730,82	3092475,00
1_G_2_500_120_4	3031201,59	3025770,35	3030294,51
1_G_2_500_120_5	3181174,29	3168517,87	3169723,22
1_G_2_500_180_1	3568785,34	3580209,77	3587662,22
1_G_2_500_180_2	3504257,92	3524675,95	3498875,51
1_G_2_500_180_3	3804130,06	3816448,22	3884206,29
1_G_2_500_180_4	3440061,83	3427056,47	3448728,16
1_G_2_500_180_5	3781756,04	3779891,51	3779858,75

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : Kemal Alaykiran
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 04.04.1979 Konya
 Medeni hali : Evli
 E-mail : kalaykiran @ gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Selçuk Üni./Endüstri Müh. Bölümü	2004
Lisans	Selçuk Üni./Endüstri Müh. Bölümü	2001
Lise	Konya Meram Anadolu Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2001-2006	Selçuk Üni. Endüstri Müh. Bölümü	Arş. Gör.
2006-2011	Gazi Üni. Endüstri Müh. Bölümü	Arş. Gör.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Alaykiran, K., Güner, E., “A Reverse Logistics Network Design for Multiple Recovery Options”, Informs Annual Meeting, Austin, ABD, 2010.
2. Güner E., Alaykiran, K., Çoruhlu, A., “Examination Staff Scheduling Model and its Application”, Informs Annual Meeting, Austin, ABD, 2010.

3. Alaykiran, K., ENGİN, O., “Karıncı Kolonileri Metasezgiseli ve Gezgin Satıcı Problemleri Üzerinde Bir Uygulaması”, Gazi Müh. Mim. Dergisi, 20:1, 69-77, 2005.
4. Aydın, C., Engin O., Alaykiran K., Fiğlali A., “Yeniden Kullanım-Üretim Süreci Ve Ülkemiz Açısından Önemi”, IV. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, 4, 4, 193 - 198, 2004.
5. Alaykiran, K., Engin, O., Fiğlali, A., Fiğlali, N., Özkale, C., “Gezgin Satıcı Problemlerinin Karınca Algoritmaları İle Çözümü Ve Sonuçların Diğer Metasezgiseller İle Karşılaştırılması”, IV. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, 4, 4, 77 - 80, 2004.
6. Özkale, C., Fiğlali, A., Fiğlali, N., Engin, O., Alaykiran, K., “Atölye Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Karınca Kolonileri Optimizasyonu İle Çözümünde Parametre Etkinliklerinin Belirlenmesi”, IV. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, 4, 4, 741 - 746, 2004.
7. Peker, A., Engin, A., Alaykiran, K., “Parameter Optimization In Ant System To Improve Its Solution Performance In Flow Shop Scheduling Problems”, 2 nd International Conference On Responsive Manufacturing, 2, 0, 267 - 269, 2002.
8. Akçay, E., Fiğlali, A., Alaykiran, K., Engin, O., “An Interactive Multi Objective Genetic Algorithm For Traveling Salesman Problem”, International Logistics Congress 2003, 1, 1, 263 - 267, 2003.
9. Alaykiran, K., Engin, O., Akçay, E., Fiğlali, A., “The Ant Colony Meta-Heuristic On A Travelling Salesman Problem Representing Cities In Turkey”, International Logistics Congress 2003, 1, 1, 268 - 270, 2003.
10. Alaykiran, K., Engin, O., Fiğlali, N., An Improvement to Ant Colony Optimization, its Comparison on Traveling Salesman Problems, 35th Computers and Industrial Engineering Congress, İstanbul, 2005.

Hobiler

Sinema, Tarih, Bilgisayar Teknolojileri.