

**TERSİNE LOJİSTİK AĞI TASARIMI İÇİN
YENİ BİR MODEL ÖNERİSİ**

Neslihan DEMİREL

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2013
ANKARA**

Neslihan DEMİREL tarafından hazırlanan TERSİNE LOJİSTİK AĞI TASARIMI İÇİN YENİ BİR MODEL ÖNERİSİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Tez Danışmanı, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Serpil EROL
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Türkay DERELİ
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gaziantep Üniversitesi

Doç. Dr. Turan PAKSOY
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Selçuk Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet ATAK
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.
Tez Savunma Tarihi: 25/01/2013

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

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
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.

Neslihan DEMİREL

TERSİNE LOJİSTİK AĞI TASARIMI İÇİN YENİ BİR MODEL ÖNERİSİ
(Doktora Tezi)

Neslihan DEMİREL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2013

ÖZET

Son yıllarda artan çevre bilinci ve doğal kaynakların tükenmesiyle birlikte tersine lojistik konusuna olan ilgi de artmaktadır. Müşterilerden geri dönen ürünlerin toplanması, yeniden işlenmesi, yeniden dağıtılması ve bertarafını konu edinen ürün geri kazanım ağlarının tasarımı önemli ve ilgi duyulan tersine lojistik problemlerinden biridir. Bu tezde tersine lojistikte stratejik karar seviyesinde ele alınan ağ tasarımına yeni bir bakış açısı kazandırmak hedeflenmiştir. Bu amaçla tersine lojistik ağı tasarımında müşterilere “artırımsal teşvik” uygulamasını dikkate alan yeni bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmiş ve sezgisel çözüm yöntemi olarak da Denge Durumu Genetik Algoritmasını GAMS-Cplex ile melezleyen bir algoritma geliştirilmiştir. İkincil pazar talepleri, geri dönen ürün miktarları, geri dönen ürünlerin geri kazanıma uygunluğunu belirleyen kabul oranları ve teşvik uygulamalarıyla ilgili farklı senaryolar incelenmiştir. Matematiksel model ve önerilen çözüm yönteminin performansının değerlendirilebilmesi için değişik boyutlarda test problemleri üretilerek çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar önerilen çözüm yönteminin çözüm kalitesi ve çözüm süresi açısından oldukça iyi performans sergilediğini göstermiştir.

Bilim Kodu : 906.1.141
Anahtar Kelimeler : Tersine lojistik, ağ tasarımı, teşvik, sezgisel.
Sayfa Adedi : 96
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

**A NEW MODEL PROPOSAL FOR REVERSE LOGISTICS NETWORK
DESIGN**

(Ph.D. Thesis)

Neslihan DEMİREL

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2013

ABSTRACT

Reverse logistics has received increasing attention in the last decades because of the increasing environmental concern and also depletion of natural resources. The design of product recovery networks including the collection, reprocessing, redistribution and disposal of the returned products is one of the important and challenging reverse logistics problems. The aim of this thesis is to introduce a new perspective of network design to strategic planning in reverse logistics environment. For this purpose, a new mixed integer programming model for a reverse logistics network including the “incremental incentive” payment to customers and a Steady-State Genetic Algorithm hybridized with GAMS-Cplex as a heuristic solution methodology are proposed. Different scenarios are generated using different parameter settings such as demands at secondary markets, returned product quantities, acceptance rates determining the availability of returned products in terms of quality for recovery and incentive payment. Performance of the mathematical model and proposed solution method has been tested through different size test problems. Results demonstrated that the proposed methodology performs very well in terms of both quality of solutions and computational time.

Science Code : 906.1.141

Key Words : Reverse logistics, network design, incentive, heuristic.

Page Number : 96

Adviser : Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

TEŞEKKÜR

Öncelikle çalışmalarına olan katkılarının yanı sıra hayata dair bana yol gösteren ve manevi desteğiyle de hep yanımda olan danışman hocam Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN'e, yine desteğini daima hissettiren hayattaki en büyük destekçim sevgili eşim Eray DEMİREL'e ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Tez izleme komite üyesi hocalarım Prof. Dr. Serpil EROL ve Prof. Dr. Türkay DERELİ ile savunma jüri üyesi hocalarım Doç Dr. Turan PAKSOY ve Doç. Dr. Mehmet ATAĞ'a çalışmalarına olan katkılarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca programlama konusunda yardımlarını benden esirgemeyen arkadaşım Arş. Gör. Emre ÇALIŞKAN'a ve 2211 Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında sağladığı maddi katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIMI	8
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	13
3.1. Tersine Ağ Tasarımı.....	14
3.2. Kapalı Döngü Ağ Tasarımı.....	22
4. TERSİNE LOJİSTİK AĞI TASARIMI İÇİN YENİ BİR MODEL ÖNERİSİ.....	31
4.1. Problemin Yapısı ve Varsayımları	31
4.2. Matematiksel Model.....	33
4.2.1 Notasyonlar	33
4.3. Örnek Problem	38
4.4. Senaryo Analizleri.....	43
4.4.1. Talep değişimlerinin etkisinin incelenmesi.....	43
4.4.2. Geri dönüş miktarlarındaki değişimin etkisinin incelenmesi.....	45
4.4.3. Kabul oranlarındaki değişimin etkisinin incelenmesi.....	46

Sayfa

4.4.4. Teşvik ile ilgili değişimlerin etkisinin incelenmesi.....	50
4.4.5. İstatistiksel analizler	52
4.5. Modelin Test Edilmesi	54
4.5.1. Test Sonuçları.....	54
5. GENETİK ALGORİTMA.....	58
5.1. Genetik Algoritma ve Temel Kavramları.....	58
5.2. Genetik Algoritmanın Aşamaları	59
6. MELEZ ÇÖZÜM YÖNTEMİ.....	67
6.1. Çözüm Yönteminin Örnek Problem Üzerinde Gösterimi	72
7. SONUÇ	78
KAYNAKLAR.....	80
EKLER.....	89
EK1 Test problemleri çözüm sonuçları	90
ÖZGEÇMİŞ.....	96

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Geri kazanım seçenekleri.....	7
Çizelge 4.1. Artırımsal teşvik ödemesi parametreleri.....	38
Çizelge 4.2. İkincil pazarlar ile ilgili veriler	38
Çizelge 4.3. Geri kazanım tesisleri ile ilgili veriler	39
Çizelge 4.4. Müşteriler ile ilgili veriler.....	39
Çizelge 4.5. Toplama merkezleri ile ilgili veriler.....	39
Çizelge 4.6. Müşterilerden toplama merkezlerine taşınan ürün miktarları (x_{mn})	40
Çizelge 4.7. Toplama merkezlerinden geri kazanım tesislerine taşınan ürün miktarları (y_{nr}).....	41
Çizelge 4.8. Geri kazanım tesislerinden ikincil pazarlara taşınan parça miktarları (z_{rk})	41
Çizelge 4.9. Farklı fiyatlardan toplanan ürün miktarları ve ilgili ikili değişken değerleri.....	42
Çizelge 4.10. A senaryosu için talepteki değişimler ve çözüm sonuçları.....	44
Çizelge 4.11. B senaryosu için geri dönüş miktarlarındaki değişimler ve çözüm sonuçları	45
Çizelge 4.12. C senaryosu için kabul oranlarındaki değişimler ve çözüm sonuçları	47
Çizelge 4.13. Artırımsal teşvik uygulaması ile ilgili senaryolar	51
Çizelge 4.14. A, B ve C senaryoları ile ilgili istatistiksel analiz sonuçları.....	53
Çizelge 4.15. Problem üretiminde kullanılan parametre aralıkları.....	54
Çizelge 4.16. Test problemi boyutları.....	55
Çizelge 4.17. Problem setleri için elde edilen ortalama çözüm sonuçları	56
Çizelge 6.1. Müşteri ve toplama merkezi parametreleri	73

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.2. Toplama ve geri kazanım tesisi parametreleri	73
Çizelge 6.3. Geliştirilen sezgisel çözüm yöntemi ile GAMS-Cplex sonuçlarının karşılaştırılması	76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Geri kazanım ağı	9
Şekil 4.1. Tersine lojistik ağ yapısı.....	31
Şekil 4.2. Talebe bağlı olarak toplam kâr, taşıma ve ceza maliyetlerindeki değişimler	44
Şekil 4.3. Geri dönüşlere bağlı olarak toplam kâr, taşıma ve ceza maliyetlerindeki değişimler	46
Şekil 4.4. Kabul oranına bağlı olarak toplam kâr, taşıma ve ceza maliyetlerindeki değişimler.....	47
Şekil 4.5. A, B ve C senaryolarının toplam kâra etkisi.....	48
Şekil 4.6. A, B ve C senaryolarının taşıma maliyetine etkisi.....	49
Şekil 4.7. A, B ve C senaryolarının ceza maliyetine etkisi.....	49
Şekil 4.8. Artırımsal teşvik uygulaması ile ilgili geliştirilen senaryoların toplam kâra etkisi	51
Şekil 4.9. Problem setleri için ortalama CPU zamanları ve yüzde sapma değerleri ..	57
Şekil 4.10. Problem setleri için ortalama kâr ve ceza maliyetleri	57
Şekil 5.1. Genetik algoritma adımları	60
Şekil 5.2. Rastgele birey seçme yöntemi	61
Şekil 5.3. Rulet tekerleği yöntemi	62
Şekil 5.4. Tek noktalı çaprazlama.....	63
Şekil 5.5. İki noktalı çaprazlama	63
Şekil 5.6. Kes-Ekle çaprazlama.....	64
Şekil 5.7. Basit mutasyon.....	64
Şekil 5.8. Değiştirme mutasyonu.....	65

Şekil	Sayfa
Şekil 5.9. Karşılıklı değişim mutasyonu	65
Şekil 5.10. Araya yerleştirme mutasyonu	65
Şekil 6.1. Melez çözüm yöntemi	70
Şekil 6.2. Kromozom yapısı	71
Şekil 6.3. Uygulanan çaprazlama operatörü.....	72
Şekil 6.4. Örnek problem için kromozom yapısı.....	74
Şekil 6.5. Müşterilerin atandığı toplama merkezleri.....	75
Şekil 6.6. GAMS ve ssGA'dan elde edilen sonuçlar arasındaki % farklar.....	77
Şekil 6.7. GAMS ve ssGA'dan elde edilen sonuçlar.....	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

br	Birim
pb	Para birimi
sn	Saniye

Kısaltmalar

Açıklama

AF	Amaç Fonksiyonu
GA	Genetik Algoritma
MILP	Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama
MINLP	Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama
OEM	Orijinal Parça Üreticisi
ssGA	Denge Durumu Genetik Algortiması

1. GİRİŞ

Günümüzde ihtiyaçların karşılanabilirliğinin devamı, çevre kirliliğinin önlenmesi, kısıtlı doğal kaynakların korunması ve gelecek nesillere aktarılması için artık açık yaşam döngüsü (beşikten mezara) yaklaşımlarından kapalı malzeme ve enerji döngüsü (beşikten beşiğe) yaklaşımlarına doğru bir eğilim söz konusudur. Ürünün tasarlanması, üretimi, dağıtımı ve kullanımı sırasında ortaya çıkacak çevreye zararlı etkilerin en aza indirgenmesi sürdürülebilir gelişme açısından yetersiz kalmakta ve hayat çevrimini tamamlamış ürünlerin ekonomiye yeniden kazandırılması zorunluluk haline gelmektedir. Firmalar böylece hem ekonomik fayda sağlayacak hem de olumsuz çevresel etkileri en aza indirgeyerek sosyal sorumluluklarını yerine getirmiş olacaklardır.

Dünya Çevre Kalkınma Komisyonu Sürdürülebilir gelişmeyi,

“Bugünün gereksinimlerini gelecek kuşakların kendi gereksinimlerini karşılayabilme olanağından ödün vermeden karşılamak”

şeklinde tanımlamıştır [Brundtland, 1987].

20. yüzyılın sonlarından itibaren sürdürülebilir gelişme kavramına duyulan ilgi beraberinde tersine lojistik, geri kazanım, yeniden imalat gibi konuların da popülerlik kazanmasına neden olmuştur.

Zorunlu geri kazanım oranlarının yasalarla garanti altına alınması, elektronik ticaret ve finansal kiralama ve finansal kiralama yaygınlaşması ve garanti kapsamının genişletilmesi gibi nedenlerle ürün iadelerinin artması ve geri dönen ürünlerin ekonomik değerleri firmaları tersine lojistik uygulamalarına yönlendiren unsurlardır [Guide ve ark., 2000].

Fleischmann ve arkadaşları tersine lojistiği;

“Kullanıcısına artık gerekmeyen kullanılmış üründen pazarda yeniden kullanılabilen ürüne kadarki tüm lojistik faaliyetlerini kapsayan bir süreç”

olarak tanımlamışlardır [Fleischmann ve ark., 1997].

Dowlatsahi ise tersine lojistiği aşağıdaki şekilde tanımlamıştır [Dowlatsahi, 2005]:

“Bir imalat tesisinin daha önceden taşınmış ürün ya da parçaları mümkün geri dönüşüm, yeniden imalat ya da bertaraf işlemlerinden birini uygulamak üzere tüketim noktasından sistematik bir şekilde yeniden elde etmesi sürecidir.”

Yüksek geri dönüş oranlarına ve kısa hayat çevrimlerine sahip, garanti kapsamı geniş ürünler için tersine lojistik faaliyetlerinin uygulanması kaçınılmaz hale gelmektedir [Harsa, 2010]. Bununla birlikte pek çok ülkede ürünlerin geri kazanımı için üretici sorumluluğunu artıran uygulamalar bulunmaktadır. Ömrünü tamamlamış araçlar, lastikler, elektrikli ve elektronik eşyalar, atık pil ve akümülatörler, ambalaj atıklarının geri kazanımı hakkında çıkarılan yönetmelikler bunlardan bazılarıdır.

Ürünlerin geri dönüş nedenleri Bloomberg ve arkadaşları tarafından aşağıda verildiği gibi sıralanmıştır [Harsa, 2010]:

- İadeler
- Kısa ve uzun dönemli kiralamalar
- İmalatçıya tamir ve yeniden imalat gibi nedenlerle ürünlerin/parçaların geri dönüşleri
- Garanti kapsamındaki geri dönüşler
- Yeniden kullanılabilir ürünlerin geri dönüşleri
- Sevkiyat sözleşmelerinden kaynaklanan geri dönüşler
- Takas
- Ürüne teknolojik yeniliklerin ilavesi, güncellemeler
- Ürün geri çağırma
- Kontrol ve kalibrasyon için geri dönüşler

Brito ve arkadaşları ise ürün, bileşen, ekipman ve materyallerin tersine lojistiğe konu olma nedenlerini aşağıdaki gibi sıralamıştır [Brito ve ark., 2002]:

Üretim dönüşleri: Yeterli olmayan kalite, fazla üretim gibi sebeplerle geri dönüşler olabilir.

Ürün geri çağırma: Bazen hatalı ürünler ancak ürün tedarik zincirine girdikten sonra fark edilebilir ve zincirden geri çağırılır.

Ticari dönüşler: Bazı ticari anlaşmalara dayalı geri gönderimler veya zamanlama ve ürün kalitesi açısından talep ve tedarikğin eşleşmemesi durumunda oluşan dönüşler.

Garanti ve servis dönüşleri: Garanti kapsamında ürünler tamir veya eşdeğeri ile değiştirilmek üzere geri dönebilir.

Kullanım sonu (end-of-use) ve hayat sonu (end-of-life) ürün dönüşleri: Kullanıcısı tarafından artık istenmeyen veya hayat çevrimini tamamlayan ürünlerin geri kazanılmak ya da uygun şekilde bertaraf edilmek üzere dönüşlerdir.

Yukarıda verilen nedenlerle tersine akışa dâhil olan ürünler için Brito ve Dekker geri kazanımın aşağıdaki şekillerde uygulanabileceğini belirtmişlerdir [Brito ve Dekker 2002]:

Ürün geri kazanımı: Ürünlerin garanti kapsamında tamir edilip, müşteriye yeniden gönderilmesini ya da geri kazanılarak birincil ve ikincil pazarlarda yeniden satılmasını ifade etmektedir.

Parça geri kazanımı: Ürünün parçalarına ayrıştırılarak, bu parçaların yeniden imal edilmesini ve benzer ya da farklı ürün üretiminde yeniden kullanılmasını tanımlamaktadır.

Malzeme geri kazanımı: Ürünün malzeme bazında geri dönüştürülerek metal, cam ve plastik gibi malzemelerin yeniden kullanılmasıdır.

Enerji geri kazanımı: Ürünün enerji elde etmek üzere yakılmasıdır.

Geleneksel ileri lojistik süreçleri tedarik, üretim, dağıtım ve tüketimi içerirken; ürün, parça ve malzemelerin geri kazanımını konu edinen genel bir tersine lojistik süreci aşağıda verilen faaliyetleri içerir [Fleischmann ve ark., 2000];

Toplama: Ürünlerin müşterilerden geri kazanılmak üzere toplanmasını ifade etmektedir.

Sınıflandırma/Ayırma: Bu süreç, ayrıştırma, parçalama, test etme, sınıflandırma ve depolama işlemlerini içerir. Geri dönen ürünlerin yeniden kullanılabilir durumda olup olmadığının kontrol edildiği ve hangi geri kazanım seçeneğiyle geri kazanılacağı kararının alındığı aşamadır. Planlanan geri kazanım seçeneğine bağlı olarak ürünler kalitelerine ve izleyecekleri rotalara göre tasnif edilir. Tersine akışa dâhil olan ürünlerin bir kısmı sınıflandırıldıktan sonra uygulanacak geri kazanım seçeneği türüne göre kullanılabilir durumdaki modüllerin alınarak iyileştirilmesi ya da çalışır durumda olmayan modüllerin yenileriyle değiştirilmesi ve teknolojik yeniliklerin ilave edilmesi gibi nedenlerle ayrıştırma (demontaj) işlemine tabi tutulur.

Yeniden işleme: Kullanılmış ürünün yeniden kullanılabilir hale getirildiği aşamadır. Bütün tersine lojistik sistemleri yukarıda bahsedilen faaliyetleri kısmen ya da tamamen içerir. Asıl farklılık yeniden işleme faaliyetinde meydana gelir. Yeniden işleme için tamir etme, geri dönüşüm, yeniden imalat gibi pek çok farklı geri kazanım seçeneği kullanılabilmektedir. Bununla birlikte temizleme, yenisiyle değiştirme ve yeniden montaj gibi işlemler de bu aşamada yapılmaktadır.

Bertaraf: Teknik ya da ekonomik açıdan geri kazanımı mümkün olmayan ürünlerin/parçaların çevreye olumsuz etkileri ortadan kaldırılacak ya da en aza indirgenecek şekilde yok edilmesidir. Atıklar yakılarak ya da gömülerek bertaraf edilebilir [Fleischmann ve ark., 2000].

Yeniden dağıtım: Geri kazanılan kullanılmış ürünlerin yeniden pazara sunulması işlemidir. Satış, taşıma ve depolama faaliyetlerini içerir.

Geri dönen ürünlerin geri kazanılması için uygulanacak seçenek; ürünün yapısı, özellikleri, dönen ürün miktarı, kalitesi, teknolojik ve ekonomik kısıtlar gibi faktörlere bağlıdır. Hangi seçeneğin uygulanacağı o ürünün geri kazanımı ve bertarafı ile ilgili kanuni düzenlemelerin olup olmaması ve düzenlemenin içeriğine bağlı olarak da değişebilmektedir. Firmalar kanunlara uyma, bilinçli müşteri beklentilerine karşılık verebilme ve kâr elde etme arzusuyla farklı geri kazanım seçenekleri (tamir, yeniden imalat, geri dönüşüm gibi) uygulamaktadırlar [Thierry ve ark., 1995];

Tamir (Repair): Kullanılmış ürünün çalışır ya da yeniden kullanılabilir duruma getirmek için onarılmasıdır. Tamir edilmiş ürünün kalitesi genellikle yeni ürüne nazaran daha düşüktür. Tamir işleminde üründe yer alan hasarlı parçalar onarılır ya da yenileriyle değiştirilir. Ürün garantisi kapsamında dönen ürünler tamir seçeneğine örnek olarak verilebilir [Thierry ve ark., 1995].

Ürün Yenileme (Refurbishing): Kullanılmış ürünün kalitesini artırmak ve ömrünü uzatmak amacıyla ayrıştırılarak önemli modüllerin kontrol edilmesi, yenileriyle değiştirilmesi, teknolojik yeniliklerin ilave edilmesi gibi işlemleri içerir. Amaç, kullanılmış ürünü belirli bir kalite seviyesine taşımaktır. Askeri ve ticari uçaklar ürün yenilemeye örnek teşkil etmektedir [Thierry ve ark., 1995].

Yeniden İmalat (Remanufacturing): Yeniden imalatın amacı kullanılmış ürünü yeni ürünün kalite standartlarına ulaştırmaktır. Yeniden imal edilen ürünler, yeni ham maddeler kullanılarak imal edilen yeni ürünlerle aynı özelliklere sahiptir. Yeniden imalatla ürünler tamamen ayrıştırılır ve tüm modül ve parçalar kontrol edilir. Tamir edilebilir durumda olanlar tamir edilerek ayrıntılı teste tabi tutulur, eskimiş ya da teknolojisi geride kalmış olanlar ise yenileriyle değiştirilir [Thierry ve ark., 1995].

Parça Alma (Cannibalization): Önceki seçeneklerden farklı olarak parça alma işleminde ürünün sadece ufak bir kısmı yeniden kullanılır. Alınan parçalar başka ürün veya bileşenlerin tamiri, yenilenmesi veya yeniden üretiminde kullanılır. Bu seçenek kullanılarak geri kazanılan parçaların kalitelerini değerlendirmek için

harcanan çaba parçanın sonrasında nasıl değerlendirileceğine göre değişmektedir. Parça alma seçeneğinin amacı, kullanılmış ürün ya da bileşenlerin yeniden kullanılabilir durumda olan kısımlarının değerlendirilmesidir [Thierry ve ark., 1995].

Yeniden Kullanım (Reusing): Konteynır, şişe, palet gibi ürünlerin çok az yeniden işlemeye tabi tutularak yeniden kullanılması söz konusu olabilmektedir [Fleischmann ve ark., 2000].

Geri Dönüşüm (Recycling): Geri dönüşüm seçeneğinde ürün ve bileşenlerin özellik ve fonksiyonları kaybolur. Geri dönüşümün amacı kullanılmış ürün ve bileşenlerin malzemelerinin yeniden kullanılabilmesidir. Elde edilen malzemenin kalitesi yüksek olduğunda geri kazanıldığı ürünlerin yenilerinin üretiminde, düşük olduğunda ise başka ürünlerin üretiminde yeniden kullanılabilir [Thierry ve ark., 1995].

Teknik ya da ekonomik açıdan hiçbir geri kazanım seçeneğinin uygulanamadığı durumlarda atıklardan kurtulmak için bertaraf yöntemine başvurulur.

Tamir, ürün yenileme, yeniden imalat, parça alma ve geri dönüşüm seçeneklerinin nitelikleri Çizelge 1.1’de karşılaştırılmıştır [Thierry ve ark., 1995].

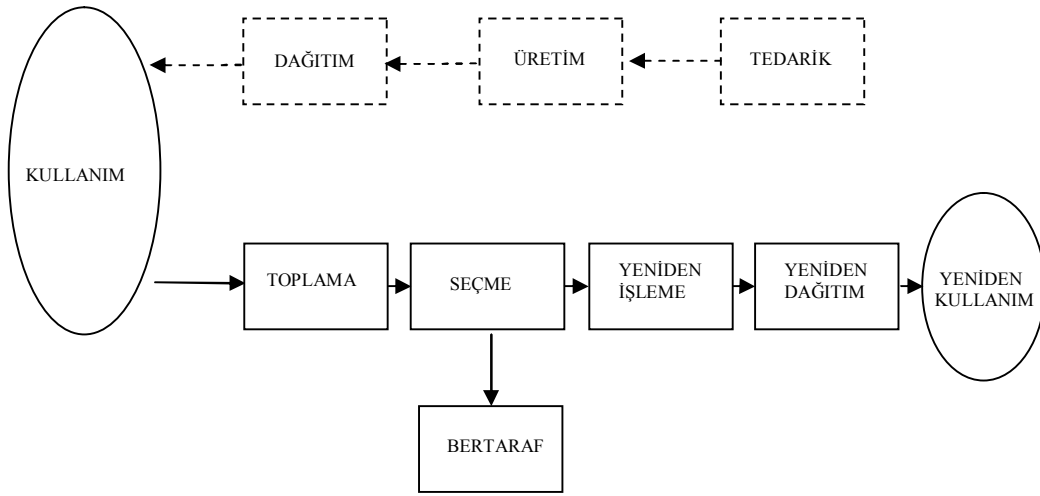
Çizelge 1.1. Geri kazanım seçenekleri

	Ayrıştırma Düzeyi	Kalite İhtiyaçları	Son ürün
Tamir	Üretim düzeyinde.	Çalışır durumda.	Bazı parçalar onarılır veya yenileriyle değiştirilir.
Ürün Yenileme	Modül düzeyinde.	Tüm kritik modüller test edilir. Ürün belirli bir kalite düzeyine ulaştırılır.	Bazı modüller onarılır/değiştirilir ve güncellenir.
Yeniden İmalat	Parça düzeyinde.	Tüm modül ve parçalar test edilir. Ürün yeni ürün kalitesine ulaştırılır.	Kullanılmış ve yeni modül/parçalar yeni ürün üretiminde birlikte kullanılır. Ürün güncellenir.
Parça Alma	Seçilen parçaların geri alınması.	Parçaların kullanılacağı sürece bağlıdır.	Bazı parçalar tekrar kullanılır, kalan ürün geri dönüştürülür veya bertaraf edilir
Geri Dönüşüm	Malzeme düzeyinde.	Orijinal parçaların üretimi için yüksek, diğerleri için düşüktür.	Malzemeler yeni parça üretmek için tekrar kullanılır.

2. TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIMI

İşletmelerin tersine lojistik faaliyetlerini uygulayabilmeleri için mevcut sistemlerinde, süreçlerinde ve karar alma aşamalarında düzenlemeler yapmaları gerekmektedir. Tersine lojistikte 3 karar seviyesi bulunmaktadır. Bunlar stratejik, taktik ve operasyonel kararlardır. Tersine lojistik ağının tasarımı, geri kazanım seçeneğinin belirlenmesi, ürün tasarımı gibi konular stratejik seviyede ele alınmaktadır. Taktik seviye, üretim planlama, stok yönetimi, pazarlama gibi kararları içermektedir. Son olarak operasyonel seviye ise üretim çizelgeleme ve kontrol gibi kararları içerir [Brito ve Dekker, 2002].

Tersine lojistik ağı kullanılmış ürünlerin tedarigi ve yeniden kullanılabilir ürün talebi arasındaki bağlantıyı sağlar [Köse, 2009]. Günümüzde firmalar, müşterilerden ürünlerini geri alarak tesislerine, depolarına taşımakla yükümlüdürler. Bu yüzden sadece ileri yönde etkili akış sağlayan bir lojistik ağı artık yeterli olmamaktadır. Ürünlerin yeniden kazanımı için kullanılmış ve geri kazanılmış ürünlerin akışına imkân veren uygun lojistik yapıların oluşturulması gerekmektedir. Ürünlerin kullanıcılarından tesislere taşınması ve yeniden pazara sunulması için yerleşim yerlerinin tespiti, tesisler ve her bir tesis arasında taşınacak miktarlar tersine lojistik ağ tasarımında alınması gereken önemli kararlar arasındadır [Fleishmann ve ark., 2001]. Genel bir geri kazanım ağı Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Geri kazanım ağı [Fleischmann ve ark., 2000]

Fleischmann ve arkadaşları çalışmalarında yeniden işleme sürecinin içeriğine bağlı olarak yeniden imalat, geri dönüşüm ve yeniden kullanım olmak üzere 3 farklı ağ yapısından bahsederken [Fleischmann ve ark., 2000], Fleischmann, geri kazanım seçeneği ve ürün tipi dikkate alınarak oluşturulan bu tersine lojistik ağı türlerini geri kazanımı tetikleyici unsurların neler olduğu ile geri kazanım sürecinin sahibinin kim olduğu faktörlerini de dikkate alarak aşağıdaki şekilde genişletmiştir [Fleischmann, 2001]:

Geri kazanımı zorunlu tutulan ürünler için ağ tasarımı: Orijinal parça üreticilerine (Original Equipment Manufacturer-OEM) ömrünü tamamlamış araçlar, elektrikli ve elektronik eşyalar gibi ürünlerin geri kazanımı ve uygun bertarafı için pek çok ülkede sorumluluklar yüklenmektedir.

Değerli ürünlerin geri kazanımı için orijinal parça üreticisi ağı: Otomobil parçaları ya da fotokopi makineleri gibi geri kazanımı ekonomik açıdan çekici olan ürünlerin geri kazanımı için tasarlanan ve OEM tarafından yönetilen ağlardır.

Kâr amaçlı tasarlanan yeniden imalat ağları: Faaliyet alanı yeniden imalat olan firmaların kâr amaçlı olarak ve arz-talep dengesini gözeterek oluşturdukları kârın en büyüklenmesini hedefleyen ağlardır.

Malzeme geri kazanımı için geri dönüşüm ağları: Ürünün bileşimini oluşturan malzemelerin geri dönüştürüldüğü, düşük kârlı, yüksek yatırım gerektiren, bunun için de yüksek hacimlerde geri kazanımın gerçekleştiği ağ türleridir.

Yeniden kullanılabilir konteynır ağları: Yeniden kullanılabilir şişeler, paletler, konteynırlar ve kartuşların geri kazanımı için geliştirilen ağlardır. Bu tür ürünlerin geri kazanımında temizleme, küçük çaplı tamir gibi çok az yeniden işleme operasyonu uygulanır.

Diğer taraftan, Lu ve arkadaşları ürün tipi ve geri kazanım seçeneği dikkate alındığında genel olarak dört farklı tersine lojistik ağından bahsedilebileceğini belirtmişlerdir [Lu ve ark., 2005]:

Yeniden Kullanım Ağı (Directly Reusable Network): Geri dönen ürünler ve malzemeler, yeni ürün üretmek veya taşıma ekipmanı olarak tekrar kullanılmak için ya doğrudan yeniden kullanılır ya da temizleme, küçük çaplı tamir gibi az bir yeniden işleme operasyonuna tabi tutulur. Geri kazanılan ürün, yeni ürüne nazaran daha düşük kalitede olsa da bu durum genellikle ürün performansını etkilemez.

Yeniden İmalat Ağı (Remanufacturing Network): Bu sistemlerin amacı dönen parçaları yeni duruma getirerek üretilecek yeni ürünlerde kullanmak, dönen ürünleri de aynı şekilde yeni konumuna getirerek satmaktır. Yeniden imal edilmiş ürün, yeni ürün ile aynı özellikleri taşır ve aynı kalite standardını sağlar.

Tamir Servis Ağı (Repair Service Network): Bu sistemler müşterilerin servis ihtiyaçlarını karşılamak ve kusurlu ürünleri tamir etmek amacıyla kurulurlar.

Geri Dönüşüm Ağı (Recycling Network): Geri dönüşümde ürün ve bileşenlerin özellik ve fonksiyonları kaybolur. Plastik ürünlerin geri kazanımı için geliştirilen ağlar geri dönüşüm ağına örnek verilebilir.

Tersine lojistik ağlarının tasarımı ve yönetimi, ileri akışı içeren geleneksel lojistik ağlara nazaran çok daha zordur [Yimsiri, 2009]. Yimsiri, ileri ve geri akışın ve etkileşimlerinin birlikte ele alınması gerekliliği ile tersine akışın ihtiva ettiği hangi geri kazanım seçeneğinin uygulanacağı, dönen ürünlerin kaliteleri, miktarları ve yeniden işleme süreleri gibi belirsizlikleri bu karmaşıklığa neden olarak göstermiştir [Yimsiri, 2009]. Patel ise tersine lojistik sistemlerin yönetimi ve planlanmasını zorlaştıran bazı özellikleri aşağıdaki şekilde tanımlamıştır [Patel, 2006]:

Belirsiz malzeme akışı: Genellikle firmalar, bir parçanın ne zaman geri döneceğini ya da bertaraf edileceğini bilmemektedir.

Belirsiz kalite ve dönen ürünlerin çeşitliliği: Firmalar, rassal ve geniş yelpazeli ürün çeşitliliği ve bunların farklı kalite seviyelerinde geri dönüşü ile karşı karşıyadır.

Müşteriye bağımlılık: Ürünlerin geri dönüşü büyük ölçüde son kullanıcıya bağımlıdır.

Zaman: Malzeme rotaları deterministik değildir ve kalite seviyelerinin değişken olmasına bağlı olarak işlem süreleri stokastiktir.

Belirsiz pazar talebi: İkincil pazarlardaki fiyat ve talep belirsizdir.

Fleischmann ve arkadaşları, etkin bir dağıtım ağının oluşturulabilmesi için aşağıda tanımlanan belirli bazı özelliklerin değerlendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [Fleischmann ve ark., 1997]:

Tersine dağıtım kanalında rol alan elemanlar kimlerdir? Elemanlar, ileri lojistikte görev alan bazı üyeler (geleneksel imalatçılar, perakendeciler, lojistik servis sağlayıcıları gibi) olabileceği gibi, tersine lojistiğe özgü görevleri gerçekleştiren yeni üyeler de (ikincil malzeme satıcıları, geri kazanım tesisleri gibi) olabilirler.

Tersine dağıtım kanalında hangi fonksiyon nerede yerine getirilecektir? Ağ tasarımı aşamasında olası fonksiyonlar olan ürün testi, sınıflandırma, ayırıştırma ve ürün işlemenin nerede yapılacağı belirlenmelidir.

İleri ve tersine dağıtım kanalı arasındaki ilişki nedir? Aynı elemanlar kullanılıyor olsa bile iki dağıtımda farklı fonksiyonlar gerçekleştirileceğinden, bunların birleştirilmesinde rotalama düzeyinde karmaşıklıklar olacaktır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde tersine lojistik konusuna farklı bakış açılarından yaklaşan pek çok çalışma yer almaktadır. 19. yüzyıldan itibaren tersine lojistiği konu edinen bu çalışmalar, tersine lojistiğin artan önemi ile tersine lojistik faaliyetlerini sistemlerine dâhil eden firmaların elde edebilecekleri faydaları ve karşılaşılabilecekleri zorlukları vurgulamaktadır [Özgün, 2007].

Araştırmacıların birçoğu ileri lojistik ile tersine lojistiğin farklı karakteristiklere sahip olduğunu, bu yüzden de tersine akış için mevcut ileri doğru işleyen lojistik ağlarının kullanılamayacağını belirtmiştir [Tibben-Lembke ve Rogers, 2002].

Lu ve arkadaşları, tersine lojistik sistemlerinin planlanmasında 2 önemli unsurun göz önünde bulundurulması gerekliliğinden söz etmişlerdir. Bunlar ürün tipi ve kullanılan geri kazanım seçeneğidir [Lu ve ark., 2005]. Örneğin, geri dönen bir fotokopi makinesi iyi durumda ise bazı kritik modülleri değiştirilerek ikincil bir pazarda satılabilir (Ürün yenileme). Makine eskimişse ve iyi durumda değilse işe yarar belirli parçaları alınarak yedek parça olarak kullanılabilir (Parça alma). Bir diğer seçenek olarak da makine çok eskimişse malzeme geri dönüşümüne tabi tutulabilir (Geri dönüşüm) [Fleischmann ve ark., 2001]. Geri kazanım işlemi teknik açıdan mümkün olsa bile ekonomik açıdan çekici olmayabilir. Geri kazanım işlemini ekonomik açıdan çekici kılabilmek ancak toplam geri kazanım maliyetlerinin büyük kısmını oluşturan taşıma maliyetini azaltacak etkili bir lojistik ağı tasarlanması ile mümkündür.

Tersine lojistikte ağ tasarımını konu edinen literatür oldukça geniştir. Literatürde bu alanda yapılmış çalışmalar için farklı sınıflandırmalar yapılmıştır. İçerdiği modelin yapısı (MILP, MINLP, Çok amaçlı gibi), stokastik ya da deterministik olması, çalışmanın örnek olay içerip içermemesi, kullanılan geri kazanım seçeneği ve çözüm yöntemi dikkate alınarak yapılan sınıflandırmalar örnek olarak verilebilir. Literatürdeki bir diğer sınıflandırma şekli de sadece tersine akışın ele alındığı

bağımsız modeller ve ileri ve geri akışın birlikte ele alındığı kapalı döngü modeller olarak karşımıza çıkmaktadır [Demirel ve Gökçen, 2008b].

Fleischmann ve arkadaşları, tersine lojistik konusunda matematiksel model içeren çalışmaları konu edinen bir literatür araştırması yapmışlardır. Yazarlar, tersine lojistik konusunda yapılan çalışmaları; dağıtım planlama, envanter kontrolü ve üretim planlama olmak üzere üç temel sınıfta incelemişlerdir. Çalışmada, tersine ağ tasarımı konusu dağıtım planlama kısmında ele alınarak, tersine dağıtım ağı ile ileri dağıtım ağının simetrik olmasının şart olmadığına vurgu yapılmıştır [Fleischmann ve ark., 1997]. Fleischmann ve arkadaşları bir diğer çalışmalarında geri kazanım ağlarının tasarım problemleri üzerinde durmuştur. Çalışmada halı, elektronik ürün, yeniden kullanılabilir paket, kum ve çelik üretiminden kaynaklanan yan ürünlerin geri kazanımı için ağ tasarımı konusunda örnek olay içeren 9 tane çalışma incelenmiştir. Çalışmada ayrıca geri kazanım ağlarının temel özellikleri belirlenerek, geleneksel ileri ağlardan ve atık bertarafını dikkate alan ağlardan farkları ortaya konmuştur [Fleischmann ve ark., 2000].

3.1. Tersine Ağ Tasarımı

Wang ve arkadaşları, kâğıtların geri dönüşümünü ele alan iki aşamalı, kapasite kısıtlı bir model geliştirmişlerdir. Atık kâğıt geri dönüşüm ağında atık kâğıtların toplandığı toplama merkezleri, aday işleme tesisleri ve işlenen kâğıtların yeniden kullanıldığı tesisler yer almaktadır [Wang ve ark., 1995]. Kâğıt geri dönüşümünü ele alan bir diğer çalışma Pati ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Yazarlar, atık kâğıtların geri dönüşümü için karma tamsayılı amaç programlama modeli geliştirmişlerdir. Matematiksel modelde tersine lojistik maliyetlerinin azaltılması, ürün kalitesinin geliştirilmesi ve çevresel fayda sağlanması amaçlanmıştır. Çok ürün, çok aşama ve çok tesis içeren model Hindistan'da kâğıt geri dönüşümü problemi üzerinde uygulanmıştır [Pati ve ark., 2008].

Spengler ve arkadaşları, iki ayrı planlama modeli için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Bunlar; çelik endüstrisindeki yan ürünlerin

geri dönüşümü ve hayat çevrimini tamamlamış ürünlerin ayrıştırılması ve geri dönüşümüdür. Çelik endüstrisi için geliştirilen model toplam maliyetlerin en küçüklenmesini amaçlarken, diğer model yeniden kullanılabilir ürünlerin elde edilmesinden kaynaklanan gelirlerden maliyetlerin çıkarılmasıyla oluşan net gelirin en büyüklenmesini amaçlamaktadır. Her iki problem için de örnek olay incelenmiştir. Geliştirilen modellerin çözümü için Lindo kullanılmıştır [Spengler ve ark., 1997].

Ammons ve arkadaşları, halı geri dönüşümü için etkin bir tersine ağ tasarlamak üzere karma tamsayılı bir programlama modeli geliştirmişlerdir [Ammons ve ark., 1997]. Halı geri dönüşümünü ele alan bir diğer çalışma, Louwers ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Yazarlar, bölgesel geri kazanım tesislerin yerlerinin ve kapasitelerinin tespit edilmesi için amaç fonksiyonu doğrusal olmayan, sürekli bir yer seçimi modeli geliştirmişlerdir. Halıların toplanması, yeniden işlenmesi ve yeniden dağıtımı için geliştirilen tesis yer seçimi ve atama probleminin Avrupa ve ABD’de olmak üzere iki farklı uygulamasını yapmışlardır. Modelin amaç fonksiyonu toplam işleme, taşıma ve yatırım maliyetlerinin en küçüklenmesidir [Louwers ve ark., 1999].

Barros ve arkadaşları, Hollanda’da kumun geri dönüşümünü konu edinen iki aşamalı bir ağ tasarlayarak karma tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen kapasite kısıtlı tesis yer seçimi modeli sezgisel tabanlı doğrusal gevşetme yaklaşımı kullanılarak çözülmüştür. Geliştirilen ağ; atık kum kaynakları, kumun yeniden kullanılabilir halde olanlarının ayrıştırıldığı ayrıştırma tesisleri ve geri dönüştürülebilir kumun elde edildiği yeniden işleme tesislerinden oluşan bir sistemdir. Modelin amacı işleme tesislerinin tipi, yeri ve sayısını toplam maliyetleri en küçükleyecek şekilde belirlemektir [Barros ve ark., 1998]. Listeş ve Dekker, Barros ve arkadaşlarının ele aldıkları kumun geri kazanımını konu edinen örnek olaya arz ve taleplerdeki belirsizlikleri dikkate almak üzere iki aşamadan oluşan stokastik bir yaklaşım uygulamışlardır [Listeş ve Dekker, 2005].

Jayaraman ve arkadaşları, toplama bölgeleri, aday dağıtım merkezleri ve yeniden imal edilmiş ürün talebi olan müşterilerden oluşan temel bir tersine lojistik ağı için

karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişler ve modeli Kuzey Amerika'da küçük bir elektronik ürünün yeniden imalatını gerçekleştiren firma üzerinde uygulamışlardır [Jayaraman ve ark., 1999].

Krikke ve arkadaşları, Hollanda'da bir fotokopi makinesi modelinin yeniden imalatı için tersine lojistik ağı tasarlamışlar ve toplam maliyetlerin en küçüklenmesini amaçlayan karma tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir [Krikke ve ark., 1999].

Shih, Taiwan'da elektrikli aletlerin ve bilgisayarların geri dönüşümünü ele alan bir çalışma yapmıştır. Geliştirilen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli, toplama ve depolama tesisleri, ayrıştırma/geri dönüşüm tesisleri, bertaraf alanları ve ikincil malzeme pazarlarından oluşmaktadır. Kârın en büyüklenmesi şeklinde geliştirilen modelde taşıma, operasyon, bertaraf gibi maliyetlerin yanı sıra geri kazanılan ürünlerin satışından elde edilen gelirler de dikkate alınmıştır. Çalışmada değişik geri dönüş oranlarını ve elektrikli aletlerle bilgisayarların aynı depolama alanlarını paylaşıp paylaşmaması stratejilerini dikkate alan 6 farklı senaryo geliştirilmiştir [Shih, 2001].

Hu ve arkadaşları, zararlı atıkların toplandığı, depolandığı, işlendiği ve dağıtıldığı bir tersine lojistik ağı için çok dönemli, çok ürünlü bir doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir [Hu ve ark., 2002].

Jayaraman ve arkadaşları, zararlı ürünlerin geri kazanımı için karma tamsayılı programlama modeli geliştirerek, toplama merkezleri ile yenileme tesislerinin sayı ve yerleri ile aralarındaki malzeme akışını en iyilemeye çalışmışlardır. Modeli sezgisel yöntem kullanarak çözen yazarlar, yöntemi 40 aday toplama merkezi ve 30 aday yenileme tesisine kadarki problem büyüklükleri için test etmişlerdir [Jayaraman ve ark., 2003].

Schultmann ve arkadaşları, Almanya'da atık pillerin geri dönüşümünü ele alan bir tersine lojistik ağı tasarlamıştır. Yazarlar, iki farklı senaryo için pil sınıflandırma

tesislerinin optimal yer ve sayısını bulmaya çalışmışlardır [Schultmann ve ark., 2003].

Pochampally ve Gupta, etkin bir tasarım için çeşitli belirsizlikleri dikkate alan üç aşamalı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Birinci aşamada, geri kazanım için ekonomik olan ürünün seçilmesine yönelik bir karma tamsayılı programlama modeli geliştirilmiş, ikinci aşamada Analitik hiyerarşi süreci yöntemi ile aday geri kazanım tesisleri belirlenmiş ve son olarak üçüncü aşamada, kesikli tesis yer seçimi modeli ile doğru ürünlerin, doğru miktarlarda taşınması sağlanmıştır [Pochampally ve Gupta, 2003].

Realff ve arkadaşları, toplama, yeniden işleme ve depolama faaliyetleri için en iyi yerleri belirlemek amacıyla çok dönemli, çok ürünlü, kapasite kısıtlı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir [Realff ve ark., 2004].

Le Blanc ve arkadaşları, Hollanda'da ömrünü tamamlamış araçlardan çıkan LPG tanklarının geri dönüşümü için 2 farklı stratejiyi değerlendirmişlerdir. Bunlardan ilkinde, LPG tankları ömrünü tamamlamış araç ayrıştırıcılarından belirli aralıklarla toplanmakta ve zehirli gazlardan arındırılmak üzere merkezi bir tesise taşınmaktadır. İkinci strateji ise LPG tanklarının belirli sayıdaki depolarda toplanarak, gezici arındırma tesislerinin buralara belirlenen zaman aralıklarında uğraması şeklindedir [Le Blanc ve ark., 2004].

Nagurney ve Toyasaki ile Chen ve arkadaşları, elektronik atıkların geri dönüşümü için atık kaynakları, toplama merkezleri, işleme tesisleri, pazarlar ve atık alanından oluşan tersine lojistik ağı tasarımında değişik ağ katmanlarındaki karar vericilerin davranışlarını analiz edebilmek amacıyla tek dönemli, tek ürünlü ağ denge modeli (network equilibrium model) geliştirmişlerdir [Nagurney ve Toyasaki, 2005; Chen ve ark., 2007]

Kusumastuti ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, tersine lojistik ağı tasarımı için çok amaçlı, çok ürünlü, çok dönemli bir karma tamsayılı programlama modeli

geliştirerek, yayılan ağaç temelli genetik algoritma ile çözmüşlerdir. Modelde net gelirin en büyüklenmesinin yanı sıra, enerji tüketimi ve CO₂ emisyonunun en küçüklenmesi amaçlanmıştır [Kusumastuti ve ark., 2004].

Min ve arkadaşları, literatürde perakendecilerden ya da son kullanıcılardan dönen ürünlerin toplandığı geri dönüş tesislerinin sayısı ve yer seçimi ile ilgili az sayıda çalışma olduğunu vurgulamışlardır. Bu boşluğu doldurmak amacıyla, çok aşamalı bir tersine lojistik ağı için doğrusal olmayan karma tamsayılı programlama modeli geliştirmişler ve modeli çözmek için de genetik algoritma (GA) kullanmışlardır. Taşıma ve envanter maliyetleri, toplama dönemi uzunluğuna bağlı olarak ele alındığı için modelin amaç fonksiyonu doğrusal değildir. Yazarlar, modelin ve çözüm algoritmasının geçerliliğini test etmek için örnek bir problem incelemişlerdir [Min ve ark., 2006a]. Yazarlar bir diğer çalışmalarında toplama merkezlerinin yerlerini, sayılarını ve müşterilerin hangi toplama merkezine atanacağını belirlemek üzere karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli geliştirerek, çözüm yöntemi olarak GA'yı temel alan sezgisel bir yaklaşım uygulamışlardır [Min ve ark., 2006b].

Assavapoke ve arkadaşları etkin bir tersine lojistik ağı tasarlamak amacıyla geliştirdikleri modelde, parametrelerin tahmini için istatistiksel bir yaklaşım kullanmışlar ve Texas'da elektronik ürünlerin geri dönüşümünü konu edinen bir örnek olay incelemişlerdir [Assavapoke ve ark., 2006].

Ahluwalia ve Nema, hayat çevrimini tamamlamış atık bilgisayarları konu edinen bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada taşıma, ayrıştırma, depolama, işleme, geri kazanım ve atık maliyetlerinden oluşan toplam maliyetleri ve çevresel riskleri en küçüklemek amaçlarını sağlamak üzere doğrusal tamsayılı bir programlama modeli geliştirilmiştir. Öne sürülen modelin karar değişkenleri; taşınan atık miktarları, işlem merkezlerinin yerleri ve her bir işlem merkezinde işlem gören, depolanan veya atılan miktarlardır. Çalışmada örnek bir olay incelenmiş ve duyarlılık analizleri yapılmıştır [Ahluwalia ve Nema, 2006].

Kim ve arkadaşlarının ele aldıkları tersine lojistik ağında, hayat çevrimini tamamlayan ürünlerin müşterilerden toplanması, ayrıştırılması ve yeniden kullanılabilir durumdaki parçaların yenilenerek ürün imalatında yeni parçalarla birlikte kullanılması süreçleri yer almaktadır. Modelde yeniden imalat işlemi için dış kaynak kullanıma imkân tanınmaktadır. Modelin amacı yeniden imalat yapılarak elde edilen tasarrufun en büyüklenmesi şeklindedir. Geliştirilen model, sayısal bir örnek için çözülmüştür [Kim ve ark., 2006].

Tang ve Xie müşteriler, toplama merkezleri, tamir merkezleri ve tesislerden oluşan bir tersine lojistik ağının çok dönemli matematiksel modelini formüle ederek, operasyonel maliyetlerin en küçüklenmesini sağlamak amacıyla GA tabanlı bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir [Tang ve Xie, 2007].

Lieckens ve Vandaele, toplanan geri dönmüş ürün miktarları ile yeniden işleme süreçlerindeki belirsizlikleri ağ tasarımına dâhil etmek için tersine lojistik ağı tasarımı ile kuyruk sistemlerini birleştirerek karma tamsayılı doğrusal olmayan bir programlama modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada GA tabanlı bir teknik kullanılarak çok sayıda örnek çözülmüştür [Lieckens ve Vandaele, 2007].

Kara ve arkadaşları, Sidney’de hayat çevrimini tamamlayan beyaz eşyaların toplanmasını ve yeniden imalatını konu edinen bir tersine lojistik ağı için simülasyon modeli geliştirmişlerdir. [Kara ve ark., 2007].

Aras ve Aksen, toplama merkezlerinin yer seçimi problemi için karma tamsayılı doğrusal olmayan tesis yer seçimi ve atama modeli geliştirmişlerdir. Modelde müşteriler, kendilerine en yakın toplama merkezi mesafesine ve kullanılmış ürünün kalitesine bağlı olarak ödenecek teşvik miktarına göre ürünlerini toplama merkezlerine getirmek istemektedir. Sezgisel bir yöntem kullanarak modeli çözen yazarlar, yöntemin performansını deney tasarımı geliştirerek test etmişlerdir [Aras ve Aksen, 2008]. Diğer bir çalışmada Aras ve arkadaşları, toplama merkezlerinin kullanılmış ürünleri müşterilerden giderek topladığı, toplama merkezleri ile müşteriler arasında taşıma yapan araçların kapasitelerini de dikkate alan karma

tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli geliştirmişler ve çözüm yöntemi olarak Tabu arama yöntemini temel alan sezgisel yaklaşım uygulamışlardır [Aras ve ark., 2008].

Srivastava, kullanıcı dönüşleri, toplama merkezleri ve yeniden işleme tesislerinden oluşan üç aşamalı, yeniden imalat ve tamir seçeneklerinin birlikte dikkate alındığı, çok dönemli bir tersine lojistik ağı için karma tamsayılı programlama modeli geliştirmiştir. Çalışmada, hiyerarşik optimizasyon modeli ile çeşitli senaryolar için sistem kârı en büyüklenmeye çalışılmıştır [Srivastava, 2008].

De Figueiredo ve Mayerle, geri dönüşüm firmasının belirli bir zaman aralığında belirli miktarda geri dönüşüm yapmasının kanunlarla belirlendiği durum için kullanılmış ürünlerin toplanması ve taşınması maliyetlerini en iyileyen ağ tasarımını oluşturmaya çalışmışlardır. Geliştirilen analitik modelle, müşterilere kullanılmış ürünlerini tesislere getirmesi için ödenecek minimum teşvik miktarı ile kullanılmış ürünleri teslim alan tesislerin yerleri ve sayısı kararlarını içeren geri dönüşüm toplama ağı maliyetlerinin en küçüklenmesi amaçlanmaktadır [De Figueiredo ve Mayerle, 2008].

Cruz-Rivera ve Ertel çalışmalarında, Meksika'daki hayat çevrimini tamamlayan araçların geri dönüşümünü ele alan tek dönemli, tek ürünlü, kapasite kısıtsız bir model geliştirmişler ve geri dönen ürünlerin %100'ünün, %90'ının ve %75'inin toplandığı üç farklı senaryo için açılacak toplama merkezleri sayısını belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmada 2005-2025 yılları arasındaki öngörülen geri dönüş sayılarına göre gerekli tesis sayıları elde edilmiştir [Cruz-Rivera ve Ertel, 2009].

Lee ve arkadaşları, çok ürünlü, ürünlerin geri döndüğü tesisler, ayrıştırma tesisleri, işleme tesisleri ve tedarikçilerden oluşan 3 aşamalı lojistik ağı maliyetlerini en küçüklemek için matematiksel model geliştirmişlerdir. İlk iki aşamanın çözümü için, öncelik tabanlı GA yaklaşımı, 3. aşamanın çözümü için ise sezgisel bir yaklaşım kullanmışlardır. Değişik boyutlu problemler için çözüm yöntemini test ederek, sonuçları prüfer sayı tabanlı GA'dan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmışlardır [Lee

ve ark., 2009a]. Yazarlar, diğerk bir çalışmalarında, 3 aşamalı lojistik ağı için birden fazla dönem içeren ve stok maliyetlerini de dikkate alan, tek rnl matematiksel model geliştirmişler, modelin çözümünde yine aynı yaklaşımı uygulamışlardır [Lee ve ark., 2009b].

Aksen ve arkadaşları, toplanan her ürün için devletin firmaya, firmanın da ürün kalitesine bağlı olarak kullanılmış ürününü getiren müşteriye teşvik verdiği bir ağı yapısı geliştirmişlerdir. Çalışmada, devlet ödeyeceği teşvik miktarını en küçüklemeye çalışırken, firma kârını en büyüklemek istemektedir [Aksen ve ark., 2009].

Shi ve arkadaşları, çalışmalarında tıbbi atıkların yönetimi için hastaneler, toplama merkezleri, işleme merkezleri ve tesislerden oluşan tersine lojistik ağı tasarlayarak, geliştirdikleri modeli GA yardımıyla çözmüşlerdir. Çalışmada, geliştirilen çözüm yönteminin testi için 6 hastane, 1 tesis, 5 aday toplama merkezi ve 3 aday işleme tesisinden oluşan örnek bir problem çözülmüştür [Shi ve ark., 2009].

Lee ve arkadaşları, tek rnl, iki aşamalı bir tersine lojistik ağı tasarlamışlar ve iki amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. İlk amaç, taşıma, tesis açma gibi ağı tasarımı maliyetlerinin en küçüklenmesi, ikinci amaç ise zamanında teslim yapılmasıdır. Yazarlar, ncelik temelli kromozom yapılı GA ile bulanık mantığı birleştirerek melez bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Küçük boyutlu problemler için elde edilen sonuçlar, Cplex'den elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak geliştirilen çözüm yönteminin performansı değerlendirilmiştir [Lee ve ark., 2010].

Pishvae ve arkadaşları, müşteriler, toplama merkezleri, geri kazanım tesisleri ve atık alanlarından oluşan bir tersine lojistik ağında, tesis açma ve taşıma maliyetlerini en küçüklemek amacıyla karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiş ve çözüm yöntemi olarak tavlama benzetimi yaklaşımını kullanmışlardır [Pishvae ve ark., 2010].

Quin ve Ji yaptıkları çalışmada, tersine lojistik sistemlerin yapısında bulunan belirsizliklerle baş edebilmek üzere ürünlerin geri kazanımını içeren ağın tasarlanmasında bulanık programlama yaklaşımını kullanmışlardır. Çalışmada, üç farklı optimizasyon modelinin çözülmesi için bulanık simulasyon ile GA'yı birlikte kullanan melez bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen model ve algoritmanın etkinliğini test edebilmek için pek çok sayısal örnek çözülmüştür [Quin ve Ji, 2010].

Gomes ve arkadaşları, Portekiz'de elektronik atıkların geri kazanımı için atık kaynakları, elektronik atıkları türlerine göre sınıflandıran tasnif merkezleri ve geri dönüşüm tesislerinden oluşan bir ağ tasarlayarak çok dönemli karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir [Gomes ve ark., 2011] .

Alumur ve arkadaşları, çok dönemli, çok ürünlü, çok parçalı, kapasitelerin değişken olduğu karma tamsayılı doğrusal bir programlama modeli geliştirmişlerdir. Amaç, ürün ve parçaların geri dönüşüm firmalarına, yeniden imalat tesislerine ve ikincil pazarlara yapılan satışlardan elde edilen gelirden sistem maliyetlerinin çıkarılmasıyla oluşan kârı en büyükmektir [Alumur ve ark., 2012].

3.2. Kapalı Döngü Ağ Tasarımı

Kroon ve Vrijens çalışmalarında ambalaj malzemelerinin yeniden kullanımını ele almışlar ve Hollanda'da konteynırların geri kazanımıyla ilgili ileri ve geri akışı birlikte modelleyen tek ürünlü bir ağ tasarımı için matematiksel model geliştirmişlerdir. Modelin çözülmesiyle birlikte, operasyonel maliyetlerin en küçüklenmesini sağlayacak en iyi konteynır sayıları ile birlikte taşıma ücretleri ve boş konteynırların nerelerde depolanacağı kararları alınmaya çalışılmıştır [Kroon ve Vrijens, 1995].

Berger ve Debaillie, bir bilgisayar imalatçısının mevcut üretim/dağıtım ağına kullanılmış ürünlerin geri kazanılması için ayrıştırma tesislerini ekleyerek bütünleşik bir lojistik ağı elde etmişlerdir [Berger ve Debaillie, 1997].

Thierry, fotokopi makinelerinin yeniden imalatını konu edinen bir ağ tasarlayarak çeşitli belirsizlikleri sisteme dâhil edebilmek için simulasyon kullanmıştır [Thierry, 1997].

Marin ve Pelegrin, geliştirdikleri karma tamsayılı programlama modelinde birincil ve ikincil olmak üzere iki tip ürün tanımlamışlardır. Müşteri talepleri tesislerden doğrudan gönderilen birincil ürünlerle karşılanmaktadır. Birincil ürünlerin belirli bir yüzdesi kullanıldıktan sonra ikincil ürün olarak tesislere geri dönmektedir. Modelin amaç fonksiyonu toplam maliyetlerin en küçüklenmesi şeklindedir. Aday tesislerin hangilerinin ve nerelere açılacağı, birincil ve ikincil ürünlerin taşınan miktarları alınan kararlar arasındadır. Yazarlar, modelin çözümü için dal-sınır tekniği ve Lagrange ayrıştırmasına dayalı sezgisel bir yöntem kullanmışlardır [Marin ve Pelegrin, 1998].

Fleischmann ve arkadaşları, ürün geri kazanım ağı için genel bir tesis yer seçimi modeli oluşturarak, modeli fotokopi makinesi yeniden imalatı ve kağıt geri dönüşümü örnekleri için çözmüşlerdir. Geliştirilen modelde, toplanamayan geri dönmüş ürünler için ceza maliyeti ve geri dönen ürünlerin belirli bir yüzdesinin uygun şekilde bertarafı dikkate alınmıştır. Çalışmada ayrıca, tersine akışın lojistik ağ yapılarına olan etkileri değerlendirilmiştir [Fleischmann ve ark., 2001].

Fleischmann çalışmasında tersine akış nedenlerini beş kategoride toplamıştır [Fleischmann, 2000]. Bunlar:

- Hayat çevrimini tamamlayan ürünlerin geri dönüşleri,
- Alınan borçlara karşılık olarak genellikle hiç kullanılmamış olarak gönderilen ticari dönüşler,
- Garanti süresi boyunca kusurlu ürünlerin geri dönüşleri,
- Üretim ıskartaları ve yan ürünlerin geri dönüşleri,
- Konteynırlar, tekrar kullanılabilir paketler ve paket artıklarını içeren paketleme malzemeleri dönüşleridir.

Çalışmada, geri dönen ürünlerin belirli bir miktarının uygun şekilde bertarafını sağlayan matematiksel bir model geliştirilerek, belirsizlikleri modele dâhil etmek için simulasyon kullanılmış ve farklı tersine lojistik ağı yapıları incelenmiştir [Fleischmann, 2000].

Listeş, ileri ve tersine akışları dikkate alan kapalı döngü bir ağ yapısı için sistemdeki belirsizlikleri hesaba katmak amacıyla genel stokastik bir model geliştirmiştir. Çalışmada talep ve geri dönüş miktarlarının farklı değerleri için senaryolar geliştirilmiş ve stokastik modelin çözümü için ayrıştırma (decomposition) yaklaşımı kullanılmıştır [Listeş, 2002]

Krikke ve arkadaşları, ürün tasarımı ve ağ tasarımı problemlerini birlikte ele almak için çok amaçlı, karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada birden fazla ürün tasarımı ve geri kazanım seçeneği dikkate alınmıştır. Geliştirilen model, maliyetlerin ve çevresel etkilerin en küçüklenmesi şeklinde iki amaca sahiptir. Japon bir buzdolabı imalatçısı için örnek olay incelenmiş ve parametrelerin farklı değerleri için çeşitli senaryo analizleri yapılmıştır [Krikke ve ark., 2003].

Fandel ve Stammen, vergi sonrası kârı en büyükmek üzere alternatif ürün ve proje yatırım kararlarının alındığı, makro ve mikro zaman dilimlerini dikkate alan bir model geliştirmiştir [Fandel ve Stammen, 2003].

Beamon ve Fernandes, imalatçıların yeni ürün ürettiği ve kullanılmış ürünleri yeniden imal ettiği bir tedarik zinciri yapısını ele almışlar ve geliştirdikleri modelde net şimdiki değer yöntemini hesaba katmışlardır. Artan üretim miktarları ile artan kirliliğe vurgu yapılan çalışmada, deterministik, çok dönemli, karma tamsayılı doğrusal bir model geliştirilmiştir. Modelde amaç, sonlu sayıda mümkün yerleşim yeri içinde maliyetleri en küçükleyecek şekilde depo ve toplama merkezlerinin nerelere açılması gerektiğinin belirlenmesidir. Yazarlar, model parametreleri için duyarlılık analizi yaparak sonuçları yorumlamışlardır [Beamon ve Fernandes, 2004].

Savaskan, imalatçıların geri dönen ürünleri doğrudan kendilerinin topladığı, geri dönen ürünlerin belirli bir teşvik uygulamak kaydıyla perakendeciler aracılığıyla toplandığı ve toplama işlemi için dış kaynak kullanıldığı 3 farklı durumu karşılaştırmıştır. Çalışmada, imalatçı açısından ikinci stratejinin en uygun strateji olduğu sonucu çıkmıştır. Yeni ve yeniden imal edilmiş ürünlerin birbirlerinin ikamesi olarak düşünüldüğü çalışmada, ileri akıştaki fiyatlandırma kararları ile geri akıştaki teşvik kararları arasındaki ilişkiyi belirlemek için oyun teorisi yaklaşımı kullanılmıştır [Savaskan, 2004].

Sim ve arkadaşları, taşıma ve operasyon maliyetleri toplamını en küçüklemek üzere Fleishmann (2001) tarafından geliştirilen genel geri kazanım ağı modelinin genişletilmiş hali olan çok ürünlü ve çok dönemli bir model geliştirmişlerdir. Yazarlar, modelin çözümü için doğrusal programlama tabanlı GA önermişler ve üretilen test problemleri için Cplex, geliştirilen çözüm yöntemi ve geleneksel GA sonuçlarını karşılaştırmışlardır [Sim ve ark., 2004].

Lu ve arkadaşları, konteynır, şişe, palet gibi doğrudan yeniden kullanılabilir ürünler için genel bir ağ tasarımı ve tesis yer seçimi problemi için stratejik bir model geliştirmişlerdir [Lu ve ark., 2005].

Salema ve arkadaşları, ilk olarak depo yer seçimi ve atama problemi için bir model geliştirmişlerdir. Amaç, eş zamanlı olarak hem tesis lokasyonlarının hem de ileri ve geri akışların en iyilenmesini sağlamaktır. Geliştirilen modelde, ilk olarak kapasite kısıtları dikkate alınmamış ve tek bir ürün için modelleme yapılmıştır. Daha sonra bu model, çok ürün ve kapasite kısıtlarını içerecek şekilde genişletilmiştir. Bir diğer makalelerinde yazarlar, Fleischmann ve arkadaşları (2001) tarafından formüle edilen genel tersine lojistik ağ tasarımı modelini, çok ürün ve tüm tesisler için alt ve üst kapasite sınırı düşünerek geliştirmişler ve örnek bir olay üzerinde dal sınır algoritması yardımıyla çözmüşlerdir. [Salema ve ark., 2006; Salema ve ark., 2007].

Sahyouni ve arkadaşları, kapalı döngü ağ tasarımı için 3 farklı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişler ve Lagrange gevşetmesini temel alan bir

yaklaşım ile çözmüşlerdir. Çalışmada, ileri ve tersine ağda bulunan tesislerin ortak kullanımına izin verilmektedir [Sahyouni ve ark., 2007].

Choinard ve arkadaşları, geri kazanım tesisleri, işleme tesisleri ve depoların yerlerini belirlemek amacıyla, dönen ürünler için birden fazla durum ve birden fazla geri kazanım seçeneğini dikkate alan deterministik bir model geliştirmişlerdir [Choinard ve ark., 2007].

Sheu, bir yandan toplama, depolama, iyileştirme, dağıtım, bertaraf maliyetlerinden geri dönüştürülen malzemelerin yeniden kullanımı sonucu elde edilen gelirin çıkarılmasıyla oluşan tersine lojistik operasyon maliyetlerini en küçükmeye çalışırken, bir yandan da ceza fonksiyonları kullanarak meydana gelebilecek riskleri en küçükleyecek şekilde iki amaçlı bir model geliştirmiştir [Sheu, 2007].

Üster ve arkadaşları, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir OEM'in yeniden imalat için tersine akışları sistemine dâhil etmek istediği bir ağ yapısını incelemişlerdir. Çalışmada, imalatçılar, dağıtım merkezleri ve perakendecilerin yerlerinin önceden bilindiği ve tersine lojistik birimlerinin en iyi yer ve sayılarının belirlendiği çok ürünlü, çok aşamalı bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Modelin çözümü için Bender's algoritmasını temel alan bir yaklaşım geliştiren yazarlar, çözüm yönteminin performansını klasik Bender's ve dal-sınır algoritmalarıyla karşılaştırmışlardır [Üster ve ark., 2007].

Hammond ve Beullens, elektronik atıkların imalatçılar ve tüketicilerden oluşan iki katmanlı ağda ileri ve tersine akışını konu edinen bir ağ denge modeli geliştirmişlerdir [Hammond ve Beullens, 2007].

Ko ve Evans, 3. parti servis sağlayıcıları için taşıma ve depolama maliyetlerini en küçükmek amacıyla çok dönemli, iki aşamalı, çok ürünlü, kapasite kısıtlı, karma tamsayılı doğrusal olmayan dinamik bir model geliştirmişlerdir. İmalatçıların ürettikleri ürünlerin depolara buradan da müşterilere taşınmasıyla ileri akış oluşmakta, tersine akışı ise müşterilerden toplanan ürünlerin tamir tesislerine,

buradan da imalatçılara taşınması oluşturmaktadır. Geliştirilen model, ileri ve tersine ağda yer alan depo ve tamir tesislerinin ortak kullanımına izin vermektedir. Çözüm yöntemi olarak, GA temelli sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem, bir problem kümesi üzerinde test edilmiş ve sayısal sonuçlar verilmiştir [Ko ve Evans, 2007].

Lu ve Bostel, tersine lojistik ağ tasarımı için iki aşamalı tesis yer seçimi problemi şeklinde ele almış ve imalatçılar, yeniden imalatçılar ve ara tesislerden oluşan bir ağ için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Amaç fonksiyonu sabit ve değişken maliyetlerin en küçüklenmesi şeklindedir. Yazarlar, Lagrange çarpanlarını temel alan bir algoritma ile öncelikle 12 aday nokta içeren küçük boyutlu bir problemi çözmüştür. Ardından daha büyük boyutlu problemler için çözümler elde edilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır [Lu ve Bostel, 2007].

Wang ve arkadaşları, Çin’de doğrudan yeniden kullanımı mümkün ürünlerin akışını konu edinen bir ağ tasarlamışlardır. Çalışmada, müşteriler internet üzerinden ürün siparişi vermekte ve üründen memnun kalmadıkları takdirde ürünlerini kontrol aşamasından geçmesi halinde iade edebilmektedir [Wang ve ark., 2007].

Listeş, çalışmasında üretim tesisleri, pazar ve geri kazanım tesislerinden oluşan bir ağ yapısı için senaryo temelli, iki aşamalı stokastik bir model geliştirmiştir. Çalışmada, talep ve geri dönüşlerin belirli seviyeleri için 12 farklı senaryo incelenmiştir [Listeş, 2007].

Demirel ve Gökçen, kullanılmış ürünlerin toplanarak ayrıştırıldığı, uygun kalitede olan parçaların yeni ürünlerin imalatında kullanıldığı bir ağ yapısı için çok ürünlü ve çok aşamalı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Modelde, müşterilerden dönen ürünlerin daha ekonomik olması durumunda toplama merkezlerine uğramadan doğrudan ayrıştırma tesislerine taşınmasına izin verilmektedir. Tek dönem için geliştirilen model, farklı boyuttaki problemler üzerinde test edilmiştir [Demirel ve Gökçen, 2008a].

Min ve Ko 3. parti servis sağlayıcılar için, kusurlu olduğu ya da taşıma sırasında zarar gördüğü için dönen ürünlerin kontrol edildiği, tamir edildiği ve yenilendiği tamir tesislerinin sayı ve yerlerinin belirlenmesi amacıyla çok dönemli, çok ürünlü, karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Yazarlar, modeli GA ile çözmüşler ve 6 farklı problem seti için elde ettikleri çözümleri Lingo ile elde edilen optimum çözümlerle karşılaştırmışlardır [Min ve Ko, 2008].

Zhou ve Wang, Fleishmann ve arkadaşlarının geliştirdikleri modeli genişleterek tamir ve yeniden imalat seçeneklerini dikkate alan, müşteriler, dağıtım merkezleri, geri kazanım tesisleri ve imalatçılardan oluşan genel bir ağ yapısı için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir [Zhou ve Wang, 2008].

Lee ve Dong, hayat çevrimini tamamlamış bilgisayarların geri kazanımı için geliştirdikleri deterministik model ile ileri ve tersine akışı birlikte en iyilemeye çalışmışlardır. Modelin çözümü için iki aşamalı sezgisel bir yöntem geliştiren yazarlar, sayısal analizlerle önerilen metodun geçerliliğini test etmişlerdir [Lee ve Dong, 2008]. Yazarlar bir sonraki çalışmalarında, çok dönemli tersine lojistik ağ tasarımı probleminde belirsizlikleri hesaba katmak amacıyla iki aşamalı stokastik bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada sezgisel çözüm yöntemi kullanılmış ve sayısal bir örnek çözülmüştür [Lee ve Dong, 2009].

Du ve Evans, imalatçının satış sonrası garanti kapsamında tamir görmek üzere dönen ürünleri için hizmet sağlayan 3. parti servis sağlayıcının tersine lojistik ağı tasarımı ele almışlardır. Yazarlar, toplam sistem maliyetinin ve tamir için gerekli çevrim zamanı toplam gecikmesinin en küçüklenmesi olmak üzere iki amaç içeren karma tamsayılı bir model geliştirmişlerdir [Du ve Evans, 2008].

Salema ve arkadaşları, tersine lojistik ağ tasarımı stratejik ve taktik kararların eş zamanlı alınabilmesi için çok dönemli, dinamik bir model geliştirmişlerdir. Ağ tasarımı konusu stratejik karar olarak makro zaman seviyesinde dikkate alınırken, üretim ve stok seviyeleri gibi kararlar taktik kararlar olarak mikro zaman seviyesinde dikkate alınmıştır [Salema ve ark., 2009]

Yang ve arkadaşları, dağıtım merkezleri, geri dönüş tesisleri ve ortak tesisler içeren bir ağ tasarımı için toplam maliyetin en küçüklenmesini amaçlayan matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Talepleri stokastik kabul eden yazarlar, modelin çözümü için genetik yerel arama algoritması önermişlerdir. Geliştirilen algoritma, 50 örnek üzerinde gösterilmiş ve sonuçlar GA ile karşılaştırılmıştır [Yang ve ark., 2009a].

Yang ve arkadaşları, hammadde tedarikçileri, imalatçılar, perakendeciler, tüketiciler ve geri kazanım tesislerinden oluşan genel bir ağ tasarımı için Hammond ve Beullens (2007) ve Sheu ve arkadaşları (2005) tarafından yapılan çalışmaları birleştirerek genişletmişlerdir. Yapılan çalışmada, geri dönüş oranları, hammaddelerin ve geri dönüştürülebilir ürünlerin taşıma oranları gibi parametrelerdeki değişikliklerin taşımalara ve net gelire olan etkisi analiz edilmiştir [Yang ve ark., 2009b].

Pishvae ve Torabi, talep, geri dönüş oranı, teslim zamanı, maliyetler ve kapasitelerin belirsiz olduğu ortamda, çok amaçlı bir lojistik ağı tasarımı problemine bulanık optimizasyon yaklaşımı uygulamışlardır [Pishvae ve Torabi, 2010].

Pishvae ve arkadaşları, üretim, dağıtım, toplama, geri kazanım ve bertaraf faaliyetleri için lojistik ağı maliyetlerini en küçüklemek ve tepkiselliği en büyüklemek amacıyla iki amaçlı karma tamsayılı bir programlama modeli geliştirmişler ve memetik algotirma ile çözmüşlerdir [Pishvae ve ark., 2010b].

Kannan ve arkadaşları, atık pillerin üretimi, dağıtımı, geri dönüşümü ve bertarafını ele alan çok aşamalı, çok dönemli, çok ürünlü karma tamsayılı bir doğrusal programlama modeli geliştirerek GA tabanlı bir sezgisel yardımıyla çözmüşlerdir. Yazarlar, küçük boyutlu problemler için geliştirdikleri algorithmadan elde ettikleri çözümleri GAMS-Cplex'den edilen optimum çözümlerle karşılaştırmışlardır [Kannan ve ark., 2010].

Zarei ve arkadaşları, yeni araçların dağıtımı ve ömrünü tamamlamış araçların toplanmasını dikkate alan bir lojistik ağı tasarlamışlardır. Çalışmada yeni araç dağıtıcılarının ömrünü tamamlamış araçları toplamakla sorumlu olduğu

varsayılmıştır. Taşıma ve ağ tasarım maliyetlerini en küçükmek üzere geliştirilen matematiksel model, GA tabanlı bir yöntem ile çözülmüştür. Geliştirilen test problemleri için elde edilen çözümler Lingo ile elde edilen çözümlerle karşılaştırılmıştır [Zarei ve ark., 2010].

Paksoy ve arkadaşları, tedarikçiler, imalatçılar, depolar, dağıtım merkezleri ve müşterilerden oluşan genel bir ileri ağ ile toplama merkezleri, tamir merkezleri, sökme tesisleri, ayrıştırma tesisleri ve atık alanlarından oluşan tersine ağı birlikte ele alan bir sistem için doğrusal bir model geliştirmişlerdir. Modelin amaç fonksiyonunda, maliyetler ve gelirler dışında taşımalarından kaynaklanan karbon dioksit yayılımları da dikkate alınmıştır [Paksoy ve ark., 2011].

Das ve Chowdhury sistem kârını en büyükmek üzere, ürünlerin geri toplanması, modüllerin geri kazanımı ve farklı kalite seviyelerindeki ürün karışımlarını içeren karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada, çok ürün, çok parça ve birden fazla ürün tasarımı dikkate alınmıştır [Das ve Chowdhury, 2012].

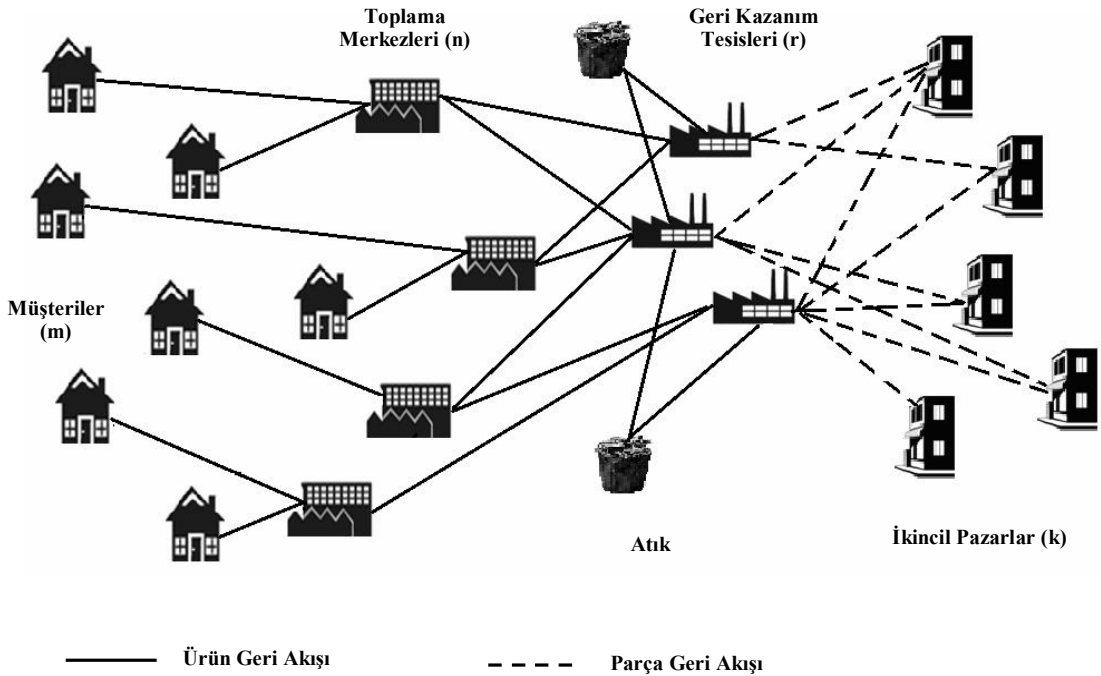
Shi ve arkadaşları, taleplerin ve geri dönen ürün miktarlarının belirsiz olduğu ortamda imalatçı kârını en büyükmek amaçlı bir matematiksel model geliştirerek, çözüm yöntemi olarak Lagrange gevşetmesine dayanan bir yaklaşım kullanmışlardır [Shi ve ark., 2011].

Literatürde tersine lojistik ağ tasarımı ve modellemesiyle ilgili yapılan çalışmalar genel olarak yer seçimi ve atama problemleri yapısında ele alınmış ve pek çoğu karma tamsayılı doğrusal programlama modeli (MILP) şeklinde formüle edilmiştir. Yukarıdaki çalışmaların birkaçında kanuni şartları yerine getirebilmek ya da geliri artırabilmek amacıyla müşterilere uygulanacak teşvik miktarlarının belirlenmesi kararı dikkate alınmıştır. Bu tezde, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak genel bir tersine lojistik ağ tasarımı problemine müşterilere dönen ürün miktarına bağlı olarak “artırımsal teşvik” uygulanması yaklaşımı ilave edilmiştir.

4. TERSİNE LOJİSTİK AĞI TASARIMI İÇİN YENİ BİR MODEL ÖNERİSİ

4.1. Problemin Yapısı ve Varsayımları

Tersine akışı modelleyen lojistik şebekelerinde, kullanıcıları tarafından istenmeyen ürünlerin toplanmasıyla tersine akış meydana gelir. Toplanan ürünler, kalite denetimlerinden geçer, yeniden işlenir ve yeniden dağıtılır. Şekil 4.1’de ürünlerin geri kazanımında kullanılan genel bir tersine lojistik şebekesi görülmektedir.



Şekil 4.1. Tersine lojistik ağ yapısı

Müşterilerde hayat çevrimlerini tamamlamış olmaları veya son kullanıcıları tarafından artık istenmemeleri nedeniyle bulunan ürünler toplama merkezlerinde toplanmaktadır. Geri kazanım tesisleri, toplama merkezlerinden aldıkları ürünleri test etmekte ve uygun kalitede olanları parçalarına ayırmaktadır. Elde edilen parçalar, burada geri kazanım sürecine katılmakta ve değer eklenerek yeniden kullanılabilir hâle getirilmektedir. Değer kazanan parçalar, talepleri karşılamak üzere ikincil pazarlarda satılmaktadır. Modelde, geri kazanılan parçaların ikincil pazarlarda oluşan talebinin karşılanamayan kısmı için bir ceza maliyeti hesaba katılmıştır. Geri

kazanım tesislerinde kalite standartlarını sağlamayan ürünler, elden çıkarma maliyetine katlanılarak çevreye en az zararı verecek uygun biçimde bertaraf edilmektedir.

Geliştirilen model ürünlerin müşterilerden toplanması, geri kazanılması, bertarafı işlemlerini yapan ve ürünlerin geri kazanımı ile elde edilen parçaların ikincil pazarlarda satışından gelir elde eden firmaların kârını en büyüleyecek tesis yer ve sayıları ile toplanan ve birimler arası taşınan geri dönmüş ürün/parça miktarlarını belirlemeye çalışmaktadır. Ele alınan problemin yapısı ve modele ait varsayımlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Tek bir ürün tipi için statik, çok aşamalı, karma tamsayılı doğrusal bir model geliştirilmiştir.
- Model kâr odaklı olarak (profit-oriented) geliştirilmiştir.
- Müşteriler ürünlerini tek bir toplama merkezine göndermektedir.
- İkincil pazarlarda karşılanamayan parça talepleri için ceza maliyetine katlanılmaktadır.
- Geri kazanım tesislerinde geri kazanılan ürünlerin her birinden, ikincil pazarlarda satılmak üzere aynı özelliklere sahip birden fazla alt montaj parçası elde edilebilmektedir.
- Modelde, müşteriler bayiler/perakendeciler olarak dikkate alınmıştır.
- Geri dönen ürünler için müşterilere belirli bir bedel ödenmektedir.
- Modelde, tedarikçilerin imalatçılara daha fazla ürün alımını avantajlı kılarak daha fazla satış yapabilmek adına uyguladıkları artırımsal miktar indirimi yaklaşımına benzer bir mantıkla, daha fazla ürün dönüşünü teşvik etmek için müşterilere dönen ürün miktarına bağlı olarak “artırımsal teşvik” uygulandığı varsayılmıştır.

4.2. Matematiksel Model

4.2.1. Notasyonlar

İndisler

k: ikincil pazarlar

m: müşteriler

n: toplama merkezleri

r: geri kazanım tesisleri

j: teşvik aralıkları $1 \leq j \leq J$

Parametreler

f_n : n toplama merkezini açık tutma maliyeti

f_r : r geri kazanım merkezini açık tutma maliyeti

TC: km başına birim ürün taşıma maliyeti

TC^p : km başına birim parça taşıma maliyeti

RC_r : r geri kazanım tesisinde birim geri kazanım maliyeti

DC_r : r geri kazanım tesisinde birim elden çıkarma maliyeti

PC: karşılanamayan talep için parça başına ödenen birim ceza maliyeti

d_{mn} : m müşterisi ile n toplama merkezi arasındaki uzaklık

d_{nr} : n toplama merkezi ile r geri kazanım tesisi arasındaki uzaklık

d_{rk} : r geri kazanım tesisi ile k ikincil pazarı arasındaki uzaklık

D_k : k ikincil pazarı parça talebi

CAP_n : n toplama merkezi kapasitesi

CAP_r : r geri kazanım tesisi kapasitesi

S: birim parça satış fiyatı

PQ: bir üründen elde edilen parça sayısı

AR: toplanan ürün miktarının geri kazanım için kalite şartlarını sağlayan kısmı

R_m : m müşterisinden geri dönen ürün miktarı

p_j : j. teşvik aralığı için birim parça toplama fiyatı.

q_j : j. teşvik aralığı üst limiti ($q_0=0$, $q_J=\infty$, $q_0 \leq q_1 \leq \dots \leq q_J$)

Karar Değişkenleri

x_{mn} : m müşterisinden n toplama merkezine taşınan kullanılmış ürün miktarı

y_{nr} : n toplama merkezinden r geri kazanım tesisine taşınan kullanılmış ürün miktarı

z_{rk} : r geri kazanım tesisinden k ikincil pazarına taşınan parça miktarı

w_{mn} : m müşterisinin ürünü n toplama merkezinde toplanırsa 1, diğer durumlarda 0

e_n : n toplama merkezi açılırsa 1, diğer durumlarda 0

e_r : r geri kazanım tesisi açılırsa 1, diğer durumlarda 0

A_{jm} : m müşterisinden toplanan ürün miktarı j aralığının üst sınırından büyükse 1, diğer durumlarda 0

CQ_{jm} : m müşterisinden j. teşvik aralığı için uygulanan fiyattan toplanan ürün miktarı

CQ_m : m müşterisinden toplanan toplam ürün miktarı

Amaç Fonksiyonu

Maks.

$$\begin{aligned}
 & S \cdot \sum_r \sum_k z_{rk} - \left(\sum_n f_n \cdot e_n + \sum_r f_r \cdot e_r + \sum_m \sum_n TC \cdot x_{mn} \cdot d_{mn} + \sum_n \sum_r TC \cdot y_{nr} \cdot d_{nr} + \right. \\
 & \left. \sum_r \sum_k TC^p \cdot z_{rk} \cdot d_{rk} + \sum_n \sum_r y_{nr} \cdot AR \cdot RC_r + \sum_n \sum_r y_{nr} \cdot (1 - AR) \cdot DC_r + \sum_j \sum_m p_j \cdot CQ_{jm} + \right. \\
 & \left. \left(\sum_k D_k - \sum_r \sum_k z_{rk} \right) \cdot PC \right) \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

Modelde Eş. (4.1) gelir ve maliyetleri içeren amaç fonksiyonu değeridir. Modelin amacı, parçaların satışından elde edilen gelirden tesis açma maliyetleri, geri yönlü ürün ve parça taşıma maliyetleri, geri kazanım maliyetleri, bertaraf maliyetleri, toplama maliyetleri ve karşılanamayan talep için ödenen ceza maliyetlerinin çıkarılması sonucu oluşacak sistem kârını en büyükmektir.

Kısıtlar:

$$\sum_n w_{mn} = 1 \quad \forall m \quad (4.2)$$

Eş. (4.2) her bir müşterinin ürünlerini yalnızca tek bir toplama merkezine göndermesini sağlamaktadır.

$$\sum_r z_{rk} \leq D_k \quad \forall k \quad (4.3)$$

Eş. (4.3) geri kazanım tesislerinden ikincil pazarlara gönderilen parça miktarının pazar talebini aşmasını önlemektedir.

$$x_{mn} \leq R_m \cdot w_{mn} \quad \forall m, n \quad (4.4)$$

Eş. (4.4) her bir müşteriden toplama merkezine gönderilen ürün miktarının geri dönen ürün miktarını aşmasını önlemektedir. Müşteri ürünlerini ilgili toplama merkezine göndermiyorsa taşınan ürün miktarının sıfır olacaktır.

$$\sum_m x_{mn} \leq CAP_n \cdot e_n \quad \forall n \quad (4.5)$$

Eş. (4.5) her bir toplama merkezine müşterilerden gelen kullanılmış ürün miktarının ilgili toplama merkezinin kapasitesini aşmasını önlemektedir. Toplama merkezi açılmamışsa müşterilerden ilgili toplama merkezine dönen ürün miktarı sıfır olacaktır.

$$\sum_m x_{mn} = \sum_r y_{nr} \quad \forall n \quad (4.6)$$

Eş. (4.6) her bir toplama merkezi için tüm müşterilerden gelen kullanılmış ürün miktarlarının ilgili toplama merkezinden geri kazanım tesislerine gönderilmesini sağlayan toplama merkezi için akış denge kısıtıdır.

$$\sum_k z_{rk} \leq \sum_n y_{nr} \cdot AR.PQ \quad \forall r \quad (4.7)$$

Eş. (4.7) her bir geri kazanım tesisi için gelen ürün miktarları ile çıkan parça miktarlarını ürünlerin kalite durumları ile üründen elde edilen parça sayısını dikkate alarak dengeleyen kısıttır.

$$\sum_n y_{nr} \leq CAP_r \cdot e_r \quad \forall r \quad (4.8)$$

Eş. (4.8) her bir geri kazanım tesisine toplama merkezlerinden gelen kullanılmış ürün miktarının ilgili geri kazanım tesisinin kapasitesini aşmasını önlemektedir. Geri kazanım tesisi açılmamışsa toplama merkezlerinden geri kazanım tesisine gönderilen ürün miktarı sıfır olacaktır.

$$CQ_m = \sum_j CQ_{jm} \quad \forall m \quad (4.9)$$

Eş. (4.9) her bir müşteriden değişik fiyatlardan toplanan toplam ürün miktarını vermektedir.

$$CQ_m = \sum_n x_{mn} \quad \forall m \quad (4.10)$$

Eş. (4.10) her bir müşteriden toplanan toplam ürün miktarını, o müşteriden toplama merkezlerine gönderilen ürün miktarına eşitlemektedir.

$$CQ_{jm} \leq q_j \quad \forall m, j = 1 \quad (4.11)$$

$$CQ_{jm} \geq q_j \cdot A_{jm} \quad \forall m, j = 1 \quad (4.12)$$

Eş. (4.11-4.12) her bir müşteriden birinci teşvik aralığı ($j=1$) için uygulanan fiyattan toplanan ürün miktarını belirleyen kısıtlardır. Sonuç olarak, A_{jm} sıfır olduğunda m müşterisinden p_j fiyatından toplanan ürün miktarı (CQ_{jm}) 0 ile q_j arasında bir değer alacaktır, $A_{jm}=1$ olduğunda ise CQ_{jm} q_j değerini alacaktır.

$$CQ_{jm} \leq (q_j - q_{j-1}) \cdot A_{j-1m} \quad \forall m, j = 2 \dots J-1 \quad (4.13)$$

$$CQ_{jm} \geq (q_j - q_{j-1}) \cdot A_{jm} \quad \forall m, j = 2 \dots J-1 \quad (4.14)$$

Eş. (4.13-4.14) her bir müşteriden j . teşvik aralığı için ($j=2 \dots J-1$) uygulanan fiyattan toplanan ürün miktarını belirleyen kısıtlardır. Sonuç olarak, $A_{j-1m}=1$ ve $A_{jm}=0$ olduğunda m müşterisinden p_j fiyatından toplanan ürün miktarı (CQ_{jm}) 0 ile $(q_j - q_{j-1})$ arasında olacaktır. $A_{j-1m}=1$ ve $A_{jm}=1$ olduğunda ise CQ_{jm} $(q_j - q_{j-1})$ kadar olacaktır.

$$CQ_{jm} \leq M \cdot A_{j-1m} \quad \forall m, j = J \quad (4.15)$$

Eş. (4.15) her bir müşteriden sonuncu teşvik aralığı için ($j=J$) uygulanan fiyattan toplanan ürün miktarını belirleyen kısıttır. Sonuç olarak, $A_{j-1m}=0$ olduğunda m müşterisinden p_j fiyatından toplanan ürün miktarı (CQ_{jm}) negatif olmama kısıtı da dikkate alınarak 0 olacaktır. Diğer taraftan, $A_{j-1m}=1$ olduğunda CQ_{jm} oldukça büyük bir sayı olarak belirlenen M 'den küçük veya M 'e eşit olacaktır, yani son teşvik aralığı için uygulanan fiyattan toplanan miktar bir bakıma kısıtlanmayacaktır.

$$x_{mn}, y_{nr}, z_{rk}, CQ_{jm} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad (4.16)$$

Eş. (4.16) negatif olmama ve tamsayı şartlarını sağlamaktadır.

$$e_n, e_r, A_{jm}, w_{mn} \in \{0,1\} \quad (4.17)$$

Son olarak Eş. (4.17) ikili değişkenlerle ilgili kısıttır.

4.3. Örnek Problem

Geliştirilen matematiksel model 4 adet ikincil pazar (talep merkezi), 20 adet müşteri (arz merkezi), 6 adet aday toplama merkezi ve 3 adet aday geri kazanım tesisinden oluşan örnek bir problem üzerinde çözülmüştür. Teşvik aralığı sayısı 3 olarak kabul edilmiş ve her bir aralığa ilişkin üst sınır değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Toplama merkezleri ilk 5000 birim ürün için müşterilere 5 pb, sonraki 3000 birim ürün için 7 pb ve 8000 birimi aşan miktarlar için ise 10 pb ödemektedir.

Çizelge 4.1. Artırımsal teşvik ödemesi parametreleri

Aralık (br)	Birim Fiyat (pb)
0-5000	5
5001-8000	7
8001-∞	10

Kullanılmış ürünü kilometre başına taşıma maliyeti 0,04 pb iken, parça taşıma maliyeti ise 0,02 pb olarak belirlenmiştir. Her bir ürünün geri kazanılmasıyla ikincil pazarlara satılabilecek 2 adet parça elde edilmektedir. Karşılanamayan talep başına ödenen ceza maliyeti 12 pb, parça satış fiyatı ise 205 pb olarak alınmıştır. Modelde ayrıca, geri kazanım tesislerine gelen ürünlerin ancak %40’ının kalite testlerinden geçerek ayrıştırıldığı varsayılmıştır. Probleme ait diğer parametreler Çizelge 4.2-4.5’de verilmektedir.

Çizelge 4.2. İkincil pazarlar ile ilgili veriler

İkincil Pazar (k)	Talep (D_k)
1	26575
2	29028
3	27344
4	28072

Çizelge 4.3. Geri kazanım tesisleri ile ilgili veriler

Geri Kazanım Tesisi (r)	Açık Tutma Maliyeti(f_r)	Geri Kazanım Maliyeti (RC_r)	Bertaraf Maliyeti (DC_r)	Kapasite (Cap_r)	İkincil Pazarlara Uzaklık (d_{rk})			
					1	2	3	4
1	17168	9	4	259317	103	520	367	370
2	16346	8	3	250699	553	894	420	242
3	16035	10	3	252909	228	516	292	397

Çizelge 4.4. Müşteriler ile ilgili veriler

Müşteri (m)	Geri Dönen Ürün Miktarları (R_m)	Toplama Merkezlerine Uzaklıklar (d_{mn})					
		1	2	3	4	5	6
1	4409	852	982	522	764	738	337
2	6167	208	742	266	137	707	401
3	9205	953	131	894	996	655	117
4	8490	210	618	499	441	905	584
5	6385	448	350	748	185	594	861
6	4146	901	898	513	253	346	366
7	5594	771	203	545	345	886	585
8	8105	990	866	950	246	184	819
9	5818	685	259	161	154	930	793
10	7516	912	450	426	817	378	926
11	6757	177	415	169	594	450	860
12	4208	147	839	248	837	661	608
13	8380	952	599	412	526	249	140
14	5943	397	178	492	454	991	145
15	4255	668	442	505	481	189	235
16	4665	850	653	341	906	479	202
17	6358	693	993	551	292	416	619
18	9235	812	473	544	829	478	122
19	5214	403	594	596	405	290	953
20	4105	565	684	564	906	863	784

Çizelge 4.5. Toplama merkezleri ile ilgili veriler

Toplama Merkezi (n)	Açık Tutma Maliyeti(f_n)	Kapasite (Cap_n)	Geri Kazanım Tesislerine Uzaklık (d_{nr})		
			1	2	3
1	9622	47065	259	576	170
2	8461	46758	455	606	353
3	9604	47816	513	485	501
4	8891	45144	829	212	231
5	8808	46688	921	930	537
6	8905	46283	877	504	494

Sistemin toplam kârını en büyükmek üzere müşterilerden toplanacak kullanılmış ürün miktarları, birimler arasında taşınacak olan ürün ve parça miktarları ile toplama ve geri kazanım tesislerinin açılıp açılmama kararlarının belirlenebilmesi amacıyla model yukarıda verilen parametreler kullanılarak çözülmüştür. Modelin çözülmesiyle, sistem kârı 15647260 olarak bulunmuştur. Çözüm 220 iterasyonda ve 0,062 saniyede ulaşılmıştır. Optimum çözümde 1, 2, 4 ve 6 numaralı toplama merkezleri ile 2 ve 3 numaralı geri kazanım tesisleri açılmıştır. 11055 adet parça talebi karşılanamayıp bunlar için ceza maliyetine katlanılmıştır. Müşterilerden toplama merkezlerine taşınan kullanılmış ürün miktarları Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Müşterilerden toplama merkezlerine taşınan ürün miktarları (x_{mn})

Müşteriler (m)	Toplama Merkezleri (n)			
	1	2	4	6
1	0	0	0	4409
2	0	0	6167	0
3	0	9205	0	0
4	8490	0	0	0
5	0	0	6385	0
6	0	0	4146	0
7	0	5594	0	0
8	0	0	8105	0
9	0	0	5818	0
10	0	7516	0	0
11	6757	0	0	0
12	4208	0	0	0
13	0	0	0	8380
14	0	5943	0	0
15	0	0	4255	0
16	0	0	0	4665
17	0	0	6358	0
18	0	0	0	9235
19	5214	0	0	0
20	4105	0	0	0

Modelde her bir müşteriye bir tek toplama merkezi hizmet verdiği için Çizelge 4.6’da müşterilerden toplanan ürünlerin tek bir toplama merkezine gönderildiği görülmektedir. Model, 6 aday toplama merkezinden 3 ve 5 numaralı olanların kapalı olmasına karar verdiğinden çizelgede ilgili toplama merkezlerine yer verilmemiştir.

Kalite denetimlerinden geçerek uygun olan ürünlerin geri kazanılması, olmayanların ise bertaraf edilmesi için toplama merkezlerinden geri kazanım tesislerine gönderilen kullanılmış ürün miktarları Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Toplama merkezlerinden geri kazanım tesislerine taşınan ürün miktarları (y_{nr})

Toplama Merkezleri (n)	Geri Kazanım Tesisleri (r)	
	2	3
1	0	28774
2	0	28258
4	35090	6144
6	0	26689

Müşterilerden toplanan ürünlerin tamamı, geri kazanım ya da uygun bertaraf işlemi için toplama merkezlerinden geri kazanım tesislerine gönderilmiştir. Optimum çözümde 1 numaralı geri kazanım tesisi açılmadığından Çizelge 4.7’de sadece 2 ve 3 numaralı geri kazanım tesisleri yer almıştır. Geri kazanım tesislerine gelen ürünler çeşitli kalite testlerine tabi tutulmakta, yeterli kalitede olanlar (örnekte %40) ayrıştırılarak ikincil pazarlarda satılacak olan parçalar elde edilmektedir. Geri kazanım için yeterli kalite standardını yakalayamayan ürünler ise elden çıkarma maliyetine katlanılarak bertaraf edilmektedir. Geri kazanım tesislerinde uygun kalitede olan ürünlerin ayrıştırılmasıyla elde edilerek ikincil pazarlara gönderilen parça miktarları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Geri kazanım tesislerinden ikincil pazarlara taşınan parça miktarları (z_{rk})

Geri Kazanım Tesisleri (r)	İkincil Pazarlar (k)			
	1	2	3	4
2	0	0	0	28072
3	26575	17973	27344	0

İkincil pazarlarda satılan parça miktarları, toplama merkezlerinden geri kazanım tesislerine gönderilen kullanılmış ürün miktarlarına, ürünlerin kalite durumlarına ve bir ürünün ayrıştırılmasıyla elde edilen parça sayısına bağlı olarak değişmektedir.

Örneğin 2 numaralı geri kazanım tesisine toplam 35090 birim ürün gelmiştir. Bu ürünlerin %40'ı ayrıştırılmış ve her birinden 2'şer adet parça elde edilmiştir. Toplamda 2 numaralı geri kazanım tesisinden 28072 adet parça ikincil pazarlara satılmak üzere gönderilmiştir ($35090 \times 0,40 \times 2 = 28072$). Her müşteriden 5000 birime kadar 5 para biriminden toplanan ürün miktarı (CQ_{1m}), 5000'den 8000'e kadar 7 para biriminden toplanan ürün miktarı (CQ_{2m}) ve 8000'i aşan 10 para biriminden toplanan ürün miktarı (CQ_{3m}) ile bunlarla ilgili 0-1 değişkenlerin aldıkları değerler Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Farklı fiyatlardan toplanan ürün miktarları ve ilgili ikili değişken değerleri

Müşteriler (m)	A_{1m}	A_{2m}	CQ_{1m}	CQ_{2m}	CQ_{3m}
1	0	0	4409	0	0
2	1	0	5000	1167	0
3	1	1	5000	3000	1205
4	1	1	5000	3000	490
5	1	0	5000	1385	0
6	0	0	4146	0	0
7	1	0	5000	594	0
8	1	1	5000	3000	105
9	1	0	5000	818	0
10	1	0	5000	2516	0
11	1	0	5000	1757	0
12	0	0	4208	0	0
13	1	1	5000	3000	380
14	1	0	5000	943	0
15	0	0	4255	0	0
16	0	0	4665	0	0
17	1	0	5000	1358	0
18	1	1	5000	3000	1235
19	1	0	5000	214	0
20	0	0	4105	0	0

CQ_{1m} : m müşterisinden 5 para biriminden toplanan ürün miktarı

CQ_{2m} : m müşterisinden 7 para biriminden toplanan ürün miktarı

CQ_{3m} : m müşterisinden 10 para biriminden toplanan ürün miktarı

A_{1m} : m müşterisinden 5000 birimden fazla ürün toplanırsa 1, diğer durumlarda 0

A_{2m} : m müşterisinden 8000 birimden fazla ürün toplanırsa 1, diğer durumlarda 0

A_{1m} ve A_{2m} ikili karar değişkenlerinin kullanılma nedeni artırımsal miktar indiriminin uygulanabilmesidir. Modelde daha fazla ürün dönüşünün teşvik edilmesi amacıyla müşterilere toplanan ürünün miktarına bağlı olarak farklı ücretler

ödenmektedir. Diğer bir ifadeyle, miktar indirimi mantığının tersi bir işleyişle daha fazla ürün gönderen müşteriye ürün başına daha fazla ücret ödenmektedir. Çizelge 4.9'da müşterilerden toplanan ürün miktarı 5000'den küçük olduğunda ilgili A_{1m} ve A_{2m} değişkenlerinin her ikisinin de 0 değerini aldığı, 5000'den büyük 8000'den küçük olduğunda ilgili A_{1m} değişkeninin 1, A_{2m} değişkeninin 0 değerini aldığı, 8000'den büyük olduğunda ise ilgili A_{1m} ve A_{2m} değişkenlerinin her ikisinin de 1 değerini aldığı görülmektedir.

4.4. Senaryo Analizleri

Bir önceki bölümde ele alınan 4 adet ikincil pazar (talep merkezi), 20 adet müşteri (arz merkezi), 6 adet aday toplama merkezi ve 3 adet aday geri kazanım tesisinden oluşan örnek problem, modelin değişik şartlardaki davranışının gözlenebilmesi amacıyla farklı senaryolar için yeniden çözülmüştür. Talep, geri dönen ürün miktarları ve ürünlerin geri kazanımı için kalite standartlarına uygunluğunu ifade eden kabul oranları kullanılarak 3 farklı senaryo üretilmiş ve bunlara ait alt senaryolar için örnekler çözülmüştür. Her bir senaryo için elde edilen amaç fonksiyonu değeri, katlanılan toplam taşıma maliyeti ve karşılanamayan parça talepleri için katlanılan ceza maliyetleri değerlendirilmiştir. A senaryosu, talebin 5 kez %5-%25 aralığında artırılıp azaltılması ile elde edilen alt senaryolardan oluşturulmuştur. B senaryosu, müşterilerden geri dönen ürün miktarlarının 5 kez %5-%25 aralığında artırılıp azaltılmasıyla oluşturulmuştur. C senaryosu ise geri kazanım tesislerindeki kabul oranının 5 kez %5-%25 aralığında artırılıp azaltılmasıyla oluşturulmuştur.

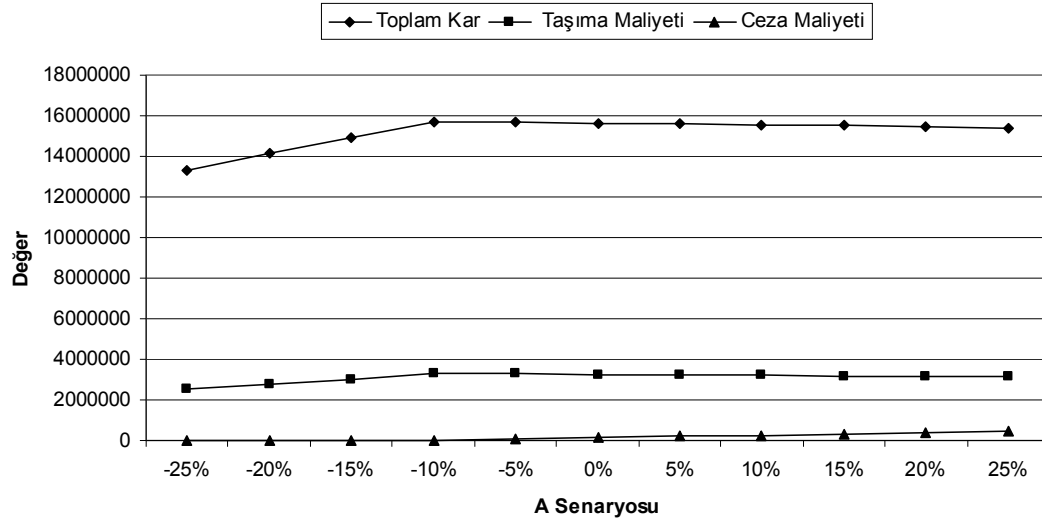
4.4.1. Talep değişimlerinin etkisinin incelenmesi

Çizelge 4.10, ikincil pazarların parça taleplerindeki değişimin model üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen A senaryosu için çözüm sonuçlarını vermektedir.

Çizelge 4.10. A senaryosu için talepteki değişimler ve çözüm sonuçları

Senaryo A	Talepteki Değişim	Toplam Kâr	Toplam Taşıma Maliyeti	Toplam Ceza Maliyeti
1	- %25	13286995,00	2555385,00	0
2	- %20	14115899,40	2790897,60	0
3	- %15	14927758,80	3035380,20	0
4	- %10	15725116,68	3297716,32	0
5	- %5	15689661,08	3277225,92	66048
Mevcut	%0	15647260,00	3254419,00	132660
6	+ %5	15604858,92	3231612,08	199272
7	+ %10	15562449,80	3208813,20	265884
8	+ %15	15520047,44	3186007,56	332496
9	+ %20	15476622,16	3164224,84	399108
10	+ %25	15420874,40	3154760,60	465720

İkincil pazarların parça talepleri ile sistem kârı, toplam taşıma maliyeti ve ceza maliyeti arasındaki ilişkiler Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Talebe bağlı olarak toplam kâr, taşıma ve ceza maliyetlerindeki değişimler

Talebin %5 ve %10 azalmasıyla birlikte taşıma maliyetleri artmıştır. Sistem kârı, ceza maliyetlerinin azalması dolayısıyla az da olsa artış göstermiştir. Talepler daha fazla azaldığında taşıma maliyeti ve sistem kârı düşüş eğilimine girmiştir. Talep %10 ve daha fazla azaldığında tüm talepler karşılanmış ve ceza maliyetleri sıfırlanmıştır. Taleplerdeki değişimler negatif yönlü olduğunda, taşıma maliyetlerinin ceza

maliyetlerinin sıfırlandığı noktadan itibaren artış eğiliminden azalış eğilimine girdiği görülmektedir. Taleplerin artmasıyla ise ceza maliyeti artmış, taşıma maliyeti ve kârlılık düşmüştür. Kârlılığın düşmesinin nedeni karşılanamayan talebin ve buna bağlı olarak katlanılan ceza maliyetinin artmasıdır. Talepler arttıkça taşıma maliyetlerinin düşme nedeni ise taleplerin artmasının parçaların ulaştırılmasında daha yakın talep noktalarının seçilme imkânı oluşturmaya bağlanabilir.

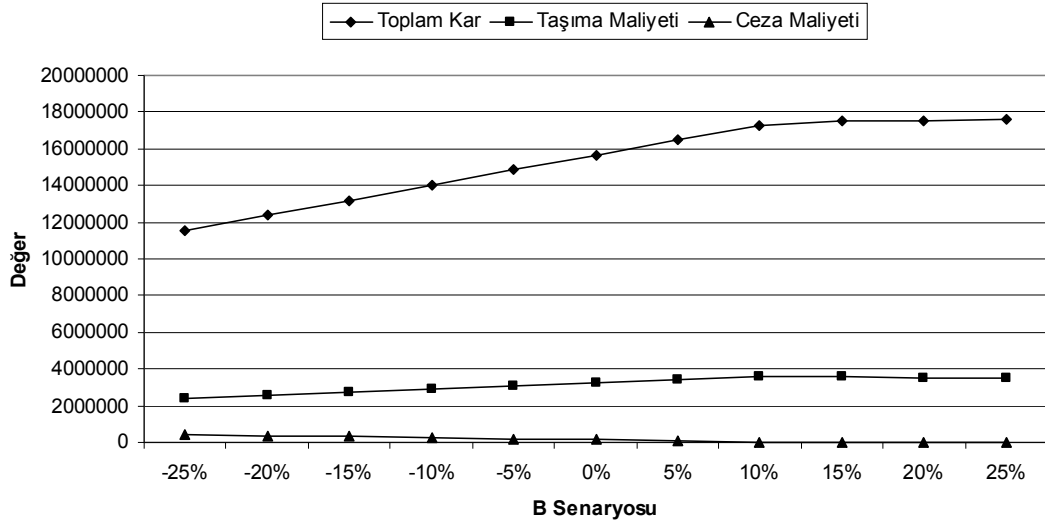
4.4.2. Geri dönüş miktarlarındaki değişimin etkisinin incelenmesi

Çizelge 4.11, müşterilerden geri dönen ürün miktarlarındaki değişimin model üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen B senaryosu için çözüm sonuçlarını vermektedir.

Çizelge 4.11. B senaryosu için geri dönüş miktarlarındaki değişimler ve çözüm sonuçları

Senaryo B	Geri Dönüşlerdeki Değişim	Toplam Kâr	Toplam Taşıma Maliyeti	Toplam Ceza Maliyeti
1	- %25	11544627,52	2369416,28	429840
2	- %20	12355004,48	2523779,12	372588
3	- %15	13190542,52	2697904,88	312600
4	- %10	14011910,16	2883449,84	252600
5	- %5	14831164,28	3068937,52	192624
Mevcut	%0	15647260,00	3254419,00	132660
6	+ %5	16462214,28	3439916,72	72696
7	+ %10	17274424,16	3628319,84	12660
8	+ %15	17495087,60	3613546,20	0
9	+ %20	17549398,52	3542459,28	0
10	+ %25	17593388,84	3491063,96	0

Müşterilerden dönen ürün miktarları ile sistem kârı, toplam taşıma maliyeti ve ceza maliyeti arasındaki ilişkiler Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Geri dönüşlere bağlı olarak toplam kâr, taşıma ve ceza maliyetlerindeki değişimler

Müşterilerden dönen ürün miktarlarının azalması ile beklenildiği gibi taşıma maliyetleri de azalmıştır. Ancak kaybedilen satış gelirleri ve karşılanamayan talebe bağlı olarak artan ceza maliyetleri sistem kârlılığının belirgin bir şekilde azalmasına neden olmuştur. Benzer şekilde, geri dönen miktarların artmasıyla kârlılık belirgin şekilde artış göstermiştir. Ceza maliyeti dönüş miktarının artmasıyla azalmış, %15 ve sonraki artışlarla birlikte sıfırlanmıştır. Taşıma maliyeti ise geri dönüş miktarlarının %10'a kadar artırılmasıyla artmış, tüm talepler karşılandıktan sonra düşüş eğilimi göstermiştir.

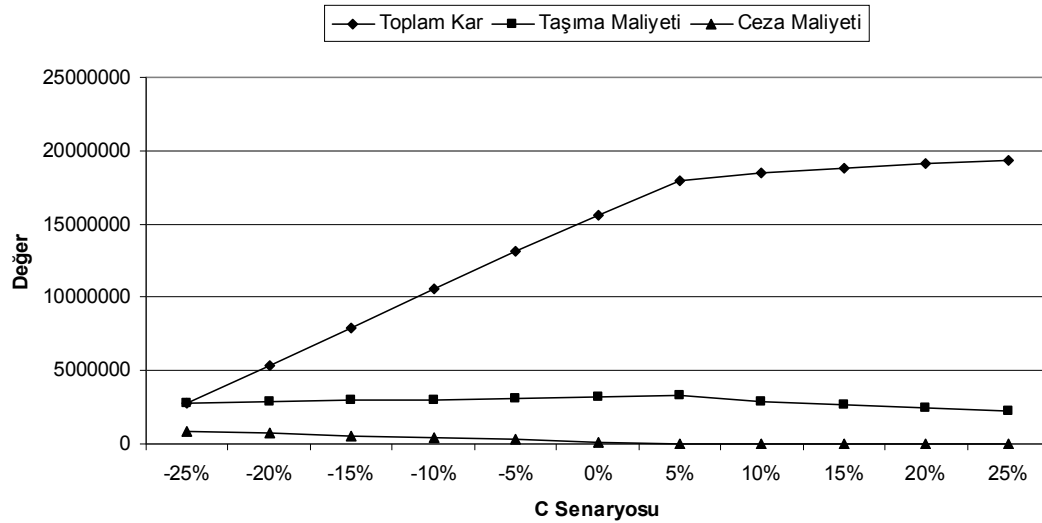
4.4.3. Kabul oranlarındaki değişimin etkisinin incelenmesi

Çizelge 4.12, geri kazanım tesislerinde ürünlerin geri kazanım için uygunluk oranlarındaki değişimin model üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen C senaryosu için çözüm sonuçlarını vermektedir.

Çizelge 4.12. C senaryosu için kabul oranlarındaki değişimler ve çözüm sonuçları

Senaryo C	Kabul Oranlarındaki Değişim	Toplam Kâr	Toplam Taşıma Maliyeti	Toplam Ceza Maliyeti
1	- %25	2725037,10	2821896,40	882396
2	- %20	5336942,68	2888915,32	732444
3	- %15	7941976,18	2956238,32	582504
4	- %10	10540595,02	3025504,48	432552
5	- %5	13112131,31	3121651,44	282612
Mevcut	%0	15647260,00	3254419,00	132660
6	+ %5	17957840,77	3320082,48	0
7	+ %10	18452354,90	2934161,60	0
8	+ %15	18820619,45	2646630,60	0
9	+ %20	19115564,52	2430725,28	0
10	+ %25	19350374,44	2253518,76	0

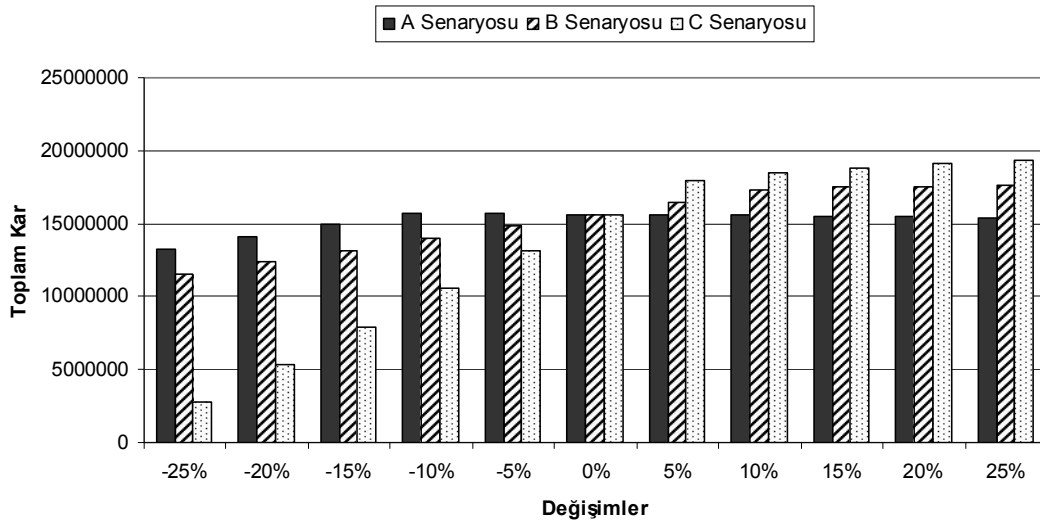
Geri kazanım tesislerindeki kabul oranları ile sistem kârı, toplam taşıma maliyeti ve ceza maliyeti arasındaki ilişkiler Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Kabul oranına bağlı olarak toplam kâr, taşıma ve ceza maliyetlerindeki değişimler

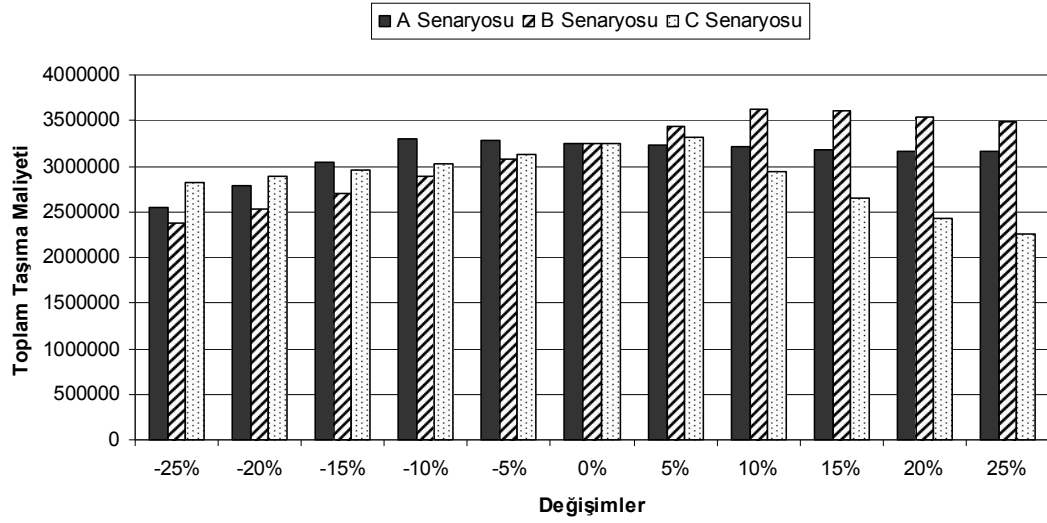
Kabul oranlarının azalmasıyla birlikte sistem kârlılığı belirgin bir şekilde düşmüştür. Yine kabul oranlarının azalmasıyla taşıma maliyetleri de azalmış, ceza maliyetleri ise artış göstermiştir. Kabul oranlarının artmasıyla, ceza maliyeti %5 ve daha sonraki

artış oranları için sıfırlanmıştır. Kabul oranının %5 artırılmasıyla taşıma maliyeti artmış, tüm taleplerin karşılandığı daha sonraki artışlarda yeniden düşme eğilimine girmiştir. Kabul oranlarının artması, sistem kârlılığını olumlu şekilde etkilemiştir. Ancak bu etki kabul oranının düşürülmesinin sistem kârı üzerindeki olumsuz etkisi kadar keskin olmamıştır. Şekil 4.5-4.8’de A, B ve C senaryoları için %5-%25 aralığındaki artış ve azalışların sırasıyla toplam kâr, taşıma maliyeti ve ceza maliyeti üzerindeki etkisi birlikte gösterilmiştir.



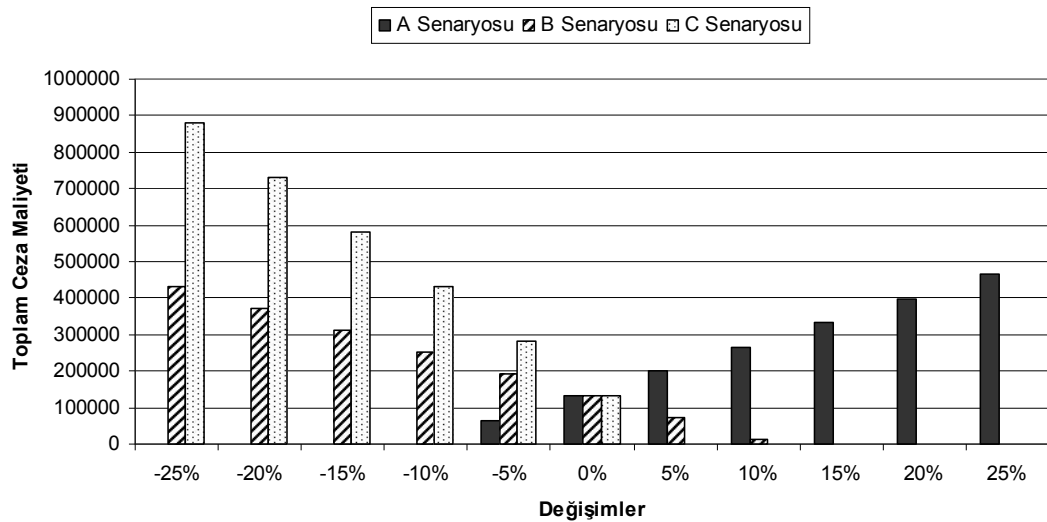
Şekil 4.5. A, B ve C senaryolarının toplam kâra etkisi

Şekil 4.5 incelendiğinde, C senaryosunun toplam kârlılık üzerinde A ve B senaryolarına nazaran daha etkili olduğu görülmektedir. A senaryosunda negatif yönlü değişim toplam kârlılık üzerinde dalgalanmaya neden olurken, pozitif yönlü değişim kârlılığı olumsuz etkilemektedir. B ve C senaryolarındaki pozitif ve negatif yönlü değişimler ise kârlılık üzerinde aynı yönlü bir etkiye neden olmuştur.



Şekil 4.6. A, B ve C senaryolarının taşıma maliyetine etkisi

Şekil 4.6 incelendiğinde, B ve C senaryosundaki negatif yönlü değişimlerin taşıma maliyetini azaltırken, pozitif değişimlerin taşıma maliyetinde dalgalı bir davranışa neden olduğu görülmüştür. A senaryosundaki negatif yönlü değişimler taşıma maliyetini dalgalandırmış, pozitif yönlü değişimler ise taşıma maliyetini düşürmüştür.



Şekil 4.7. A, B ve C senaryolarının ceza maliyetine etkisi

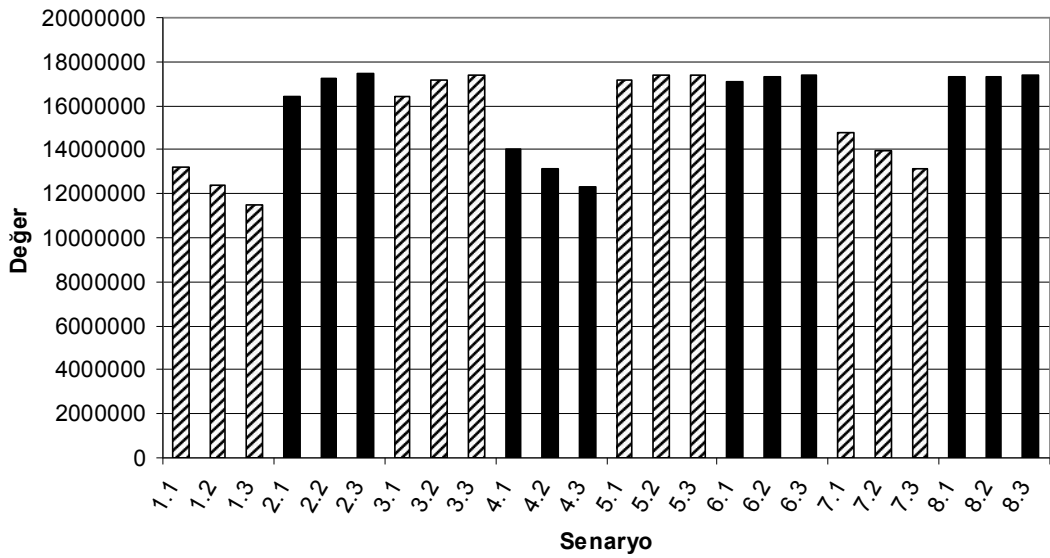
Şekil 4.7 incelendiğinde, B ve C senaryolarındaki artış ve azalışların ceza maliyetini zıt yönde, A senaryosundaki değişikliklerin ise ceza maliyetini aynı yönde etkilediği görülmektedir. Şekilden kabul oranının ceza maliyetleri üzerindeki etkisinin talep ve geri dönüş miktarlarına nazaran daha kuvvetli olduğu sonucuna varılmaktadır.

4.4.4. Teşvik ile ilgili değişimlerin etkisinin incelenmesi

Bu bölümde, geri dönen ürün miktarına bağlı olarak müşterilere uygulanacak “artırımsal teşvik” ile ilgili olarak 8 farklı senaryo geliştirilmiştir. Üretilen her bir senaryoda q_j ve p_j parametrelerinin aldığı farklı değerler ve olası geri dönüş miktarları için elde edilen amaç fonksiyonu değerlendirilmiştir. Çizelge 4.13’de uygulanan teşvik miktarının ve ödenecek teşvik miktarını belirlemede temel alınan aralıkların değişmesi durumunda modelin davranışının belirlenebilmesi amacıyla üretilen farklı senaryolar ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Mevcut durumda (Senaryo 0) teşviğe temel oluşturan miktarlar $q_0=0$, $q_1=5000$, $q_2=8000$, $q_3=\infty$, müşterilere toplanan ürün başına ödenen ücretler ise $p_1=5$, $p_2=7$, $p_3=10$ pb şeklindedir. Çizelge 4.13’de 1 ve 2 numaralı senaryoda modelde temel alınan aralıklar sabit tutulmuş, uygulanan teşvik miktarları artırılıp azaltılmış ve amaç fonksiyonunun aldığı değerler incelenmiştir. Senaryo 3, 4 ve 5’te q_1 değeri 1000 birim, q_2 değeri ise 2000 birim azaltılmış ve farklı teşvik ödemeleri için amaç fonksiyonunun aldığı değerler incelenmiştir. Senaryo 6, 7 ve 8’de q_1 değeri 2000 birim, q_2 değeri ise 3000 birim azaltılarak farklı teşvik miktarları için amaç fonksiyonunun aldığı değerler incelenmiştir. Alt senaryolar uygulanan politikaların geri dönen ürün miktarları üzerindeki muhtemel etkilerini incelemek üzere türetilmiştir. Çizelge incelendiğinde, geri dönen ürün miktarlarının aynı değerleri için teşvik uygulanacak aralıkların daraltılmasının uygulanan teşvik miktarlarının artırılmasına nazaran firma açısından daha az avantajlı olduğu sonucuna varılmaktadır. Şekil 4.8 gerçekleştirilen senaryo analizine ilişkin sonuçları göstermektedir.

Çizelge 4.13. Artırımsal teşvik uygulaması ile ilgili senaryolar

Senaryo	Aralık (br)	Uygulanan teşvik Miktarları (%)	Alt Senaryo	Geri Dönüş Miktarları (%)	Toplam Kâr (pb)
0	0-5000 5000-8000 8000-∞	0 ($p_1=5$) 40 ($p_2=7$) 100 ($p_3=10$)	0	Mevcut	15647260,00
1	0-5000 5000-8000 8000-∞	0 ($p_1=5$) 30 ($p_2=6,5$) 50 ($p_3=7,5$)	1.1 1.2 1.3	-%15 -%20 -%25	13198122,50 12360676,98 11511113,70
2	0-5000 5000-8000 8000-∞	0 ($p_1=5$) 60 ($p_2=8$) 100 ($p_3=10$)	2.1 2.2 2.3	+%5 +%10 +%15	16433674,28 17243232,16 17464250,60
3	0-4000 4000-6000 6000-∞	0 ($p_1=5$) 40 ($p_2=7$) 100 ($p_3=10$)	3.1 3.2 3.3	+%5 +%10 +%15	16382489,28 17185975,16 17406404,16
4	0-4000 4000-6000 6000-∞	0 ($p_1=5$) 30 ($p_2=6,5$) 50 ($p_3=7,5$)	4.1 4.2 4.3	-%10 -%15 -%20	13992722,66 13171132,52 12337949,98
5	0-4000 4000-6000 6000-∞	0 ($p_1=5$) 60 ($p_2=8$) 100 ($p_3=10$)	5.1 5.2 5.3	+%10 +%15 +%20	17153871,16 17375034,16 17422855,16
6	0-3000 3000-5000 5000-∞	0 ($p_1=5$) 40 ($p_2=7$) 100 ($p_3=10$)	6.1 6.2 6.3	+%10 +%15 +%20	17104374,16 17326558,60 17376878,52
7	0-3000 3000-5000 5000-∞	0 ($p_1=5$) 30 ($p_2=6,5$) 50 ($p_3=7,5$)	7.1 7.2 7.3	-%5 -%10 -%15	14772108,78 13954567,16 13136384,52
8	0-3000 3000-5000 5000-∞	0 ($p_1=5$) 60 ($p_2=8$) 100 ($p_3=10$)	8.1 8.2 8.3	+%15 +%20 +%25	17288549,60 17340977,52 17381808,32



Şekil 4.8. Artırımsal teşvik uygulaması ile ilgili geliştirilen senaryoların toplam kâra etkisi

4.4.5. İstatistiksel analizler

Talep değişimleri, geri dönüş miktarı ve kabul oranı değişimlerinden oluşan A, B ve C senaryolarının toplam kâr, taşıma maliyeti ve ceza maliyeti üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak analiz edilmesi için SPSS paket programı kullanılmıştır. Elde edilen R^2 değerleri, anlamlılık düzeyleri, regresyon denklemleri ve korelasyon katsayıları Çizelge 4.14’de toplu halde verilmiştir. Sonuçlar, geri dönen ürün miktarları ile toplam taşıma maliyetleri ve talepler ile toplam ceza maliyetleri arasında aynı yönlü kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir. Geri dönen ürün miktarları ve kabul oranları ile toplam ceza maliyetleri arasında ise zıt yönlü kuvvetli bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucu, geri dönen ürün miktarlarındaki ve kalite oranlarındaki değişimin toplam kâr üzerinde oldukça kuvvetli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum dönen ürün miktarına bağlı olarak müşterilere teşvik ödenmesiyle artması beklenen dönen ürün miktarlarının sistem kârını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Dönen ürün miktarına bağlı olarak uygulanan teşvikle birlikte müşterilere dönen ürünün kalitesine göre de teşvik uygulanması ile kalite seviyelerinde de iyileştirmeler elde edilerek toplam kârın artırılması sağlanabilir.

Çizelge 4.14. A, B ve C senaryoları ile ilgili istatistiksel analiz sonuçları

Değişkenler		Regresyon Analizi			Korelasyon Analizi
Bağımsız Değişken (X)	Bağımlı Değişken (Y)	Belirginlik Katsayısı (R ²)	Anlamlılık	Denklem	Korelasyon Katsayısı
Talep Değişimi	Toplam Kâr	0,452	0,023	$Y=15179776,698+3178003,280*X$	0,236
Talep Değişimi	Toplam Taşıma Maliyeti	0,379	0,044	$Y=3105131,120+857936,175*X$	0,236
Talep Değişimi	Toplam Ceza Maliyeti	0,933	0	$Y=169198,909+1015911,273*X$	0,977
Geri Dönüş Miktarı Değişimi	Toplam Kâr	0,953	0	$Y=15268638,396+13107472,000*X$	1
Geri Dönüş Miktarı Değişimi	Toplam Taşıma Maliyeti	0,888	0	$Y=3137564,785+2598291,309*X$	0,909
Geri Dönüş Miktarı Değişimi	Toplam Ceza Maliyeti	0,945	0	$Y=161660,727-941301,818*X$	-0,991
Kabul Oranı Değişimi	Toplam Kâr	0,912	0	$Y=13545517,852+34826606,016*X$	1
Kabul Oranı Değişimi	Toplam Taşıma Maliyeti	0,264	0,106	$Y=2877613,062-1015950,225*X$	-0,373
Kabul Oranı Değişimi	Toplam Ceza Maliyeti	0,869	0	$Y=276833,455-1861269,818*X$	-0,953

4.5. Modelin Test Edilmesi

Tersine lojistik şebekesindeki akışları en iyilemek üzere yer seçimi ve atama problemi yapısında geliştirilen karma tamsayılı matematiksel modelin test edilmesi amacıyla farklı boyutlarda test problemleri üretilmiş ve GAMS-Cplex kullanılarak bu test problemleri çözülmüştür. 12 farklı boyutta geliştirilen her bir problem büyüklüğü için 10 adet aynı yapıda örnek problem üretilerek çözülmüş ve toplamda 120 adet sonuç elde edilmiştir. Rastgele problem üretiminde kullanılan parametre aralıkları Çizelge 4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.15. Problem üretiminde kullanılan parametre aralıkları

Parametre	Aralık
Parça satış fiyatı (pb)	200-220
Talepler (br)	25000-30000
Geri dönüş miktarı (br)	4000-10000
Bir üründen elde edilen parça sayısı (br)	1-3
Km başına birim ürün taşıma maliyeti (pb)	0,01-0,05
Km başına birim parça taşıma maliyeti (pb)	0,01-0,05
Karşılanamayan talep başına ödenen birim ceza maliyeti (pb)	10-15
Birim geri kazanım maliyeti (pb)	8-12
Birim elden çıkarma maliyeti (pb)	2-5
Kabul oranı (Geri kazanım için kalite şartlarını sağlayan kısım)	0,2-0,6
Geri kazanım tesisi açma maliyeti (pb)	15000-18000
Toplama merkezi açma maliyeti (pb)	8000-10000
Geri kazanım tesisi kapasitesi (br)	250000-260000
Toplama merkezi kapasitesi (br)	45000-50000
Uzaklıklar (km)	100-1000

4.5.1. Test Sonuçları

Düzenli dağılıma uygun olarak farklı test problemleri üretilmesi ve GAMS modeline dönüştürülmesi için C++ programlama dili kullanılarak bir yazılım geliştirilmiştir. Problem setleri, problemin sırasıyla içerdiği İkincil pazar-Müşteri-Toplama merkezi-

Geri kazanım tesisi (k-m-n-r) sayıları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Farklı sayılarda müşteri, toplama merkezi, geri kazanım tesisi ve talep noktası içeren test problemlerine ilişkin veriler Çizelge 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Test problemi boyutları

Tür	Boyut	İkincil Pazar sayısı (k)	Müşteri sayısı (m)	Aday toplama merkezi sayısı (n)	Aday geri kazanım tesisi sayısı (r)
1	2-10-5-2	2	10	5	2
2	3-15-5-2	3	15	5	2
3	4-20-6-3	4	20	6	3
4	5-30-8-3	5	30	8	3
5	8-40-10-3	8	40	10	3
6	10-50-15-5	10	50	15	5
7	15-75-20-5	15	75	20	5
8	20-100-25-5	20	100	25	5
9	30-150-40-8	30	150	40	8
10	40-200-50-10	40	200	50	10
11	50-250-60-10	50	250	60	10
12	100-500-120-20	100	500	120	20

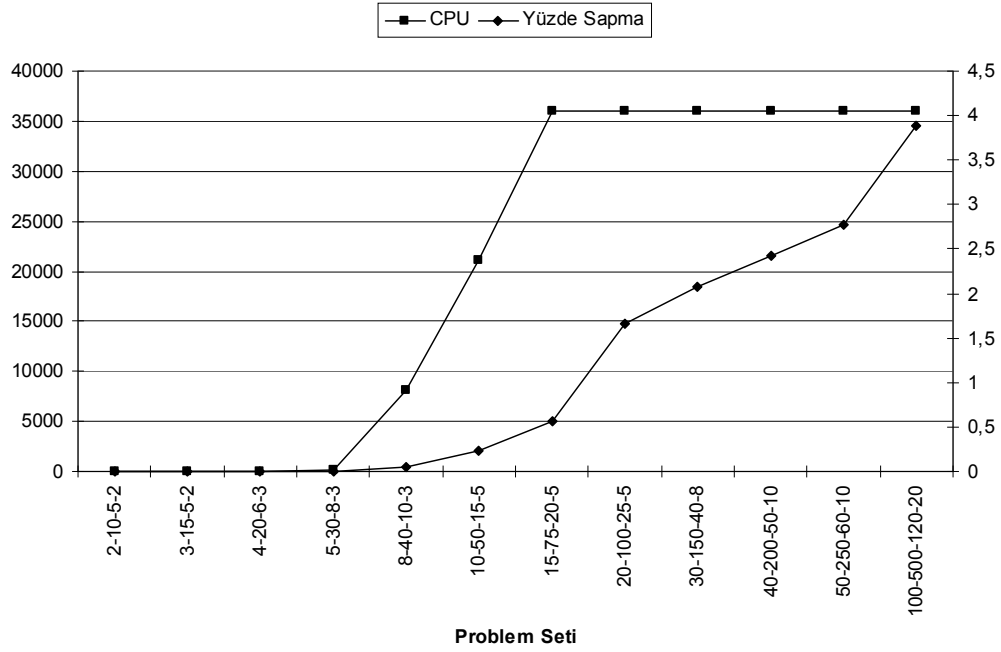
Her bir problem boyutu için 10’ar adet üretilen örnek problemin 36000 saniye (10 saat) çözülmesiyle elde edilen değerlerin ortalamaları Çizelge 4.17’de verilmiştir. 12 problem setinin her biri için üretilen 10’ar adet probleme ait çözüm sonuçları Ek 1’de verilmiştir. 150 ve daha büyük sayıda müşteri (m) içeren büyük boyutlu problemlerin çözüm süresi 100 saati aştığından çözülen 120 problem için kaynak kullanımı (resource usage) 10 saatle sınırlandırılmış ve bu süre sonunda elde edilen alt ve üst sınır değerleri değerlendirilmiştir. Alt sınır değerleri 10 saat sonucunda elde edilen amaç fonksiyonunu ifade ederken, üst sınır değerleri ise ilgili problemin çözülmesiyle elde edilebilecek en iyi amaç fonksiyonu değerini ifade etmektedir. Çizelge 4.17 incelendiğinde, 5. problem setine kadar elde edilen alt ve üst sınır değerlerinin aynı olduğu görülmektedir. Bu durum, bu noktaya kadarki tüm problem boyutları için çözülen problemlerin tamamında optimum sonuca ulaşıldığını göstermektedir. 5. problem setinden sonra problem boyutu arttıkça alt ve üst sınır değerleri arasındaki farkı ifade eden yüzde sapma değeri de artış göstermiştir.

İterasyon ve düğüm sayılarının ise belirli bir boyuta kadar arttığı daha sonra ise azaldığı gözlenmiştir.

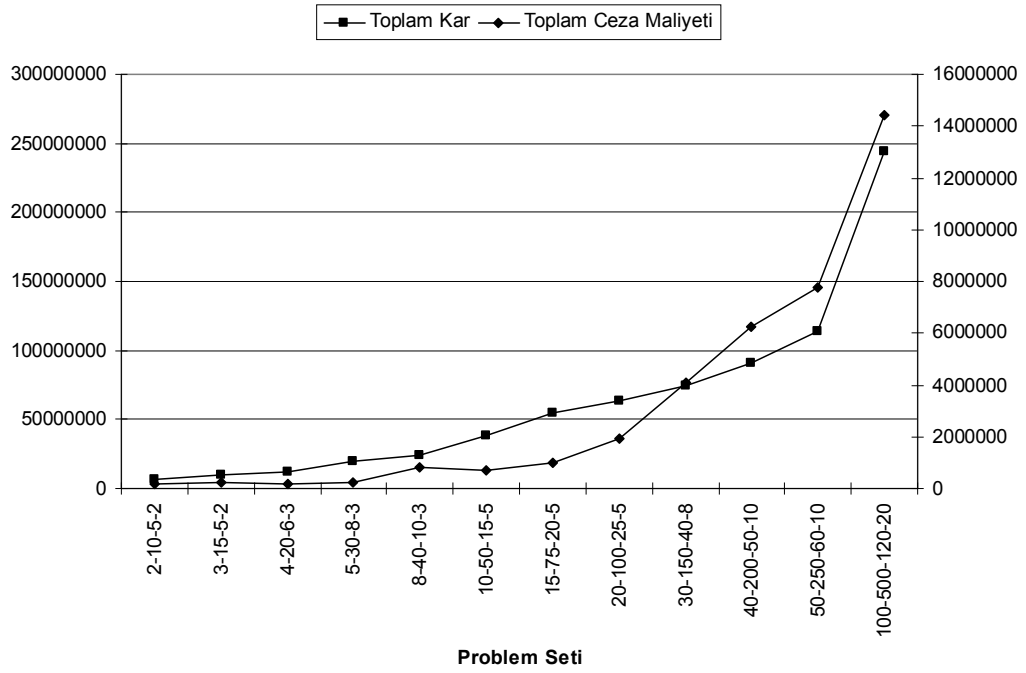
Çizelge 4.17. Problem setleri için elde edilen ortalama çözüm sonuçları

Problem Seti	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı(sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	6744201,04	6744201,04	6,7	129,4	0,07	0,00
2	9730419,18	9730419,18	31,5	358,0	0,10	0,00
3	15845257,94	15845257,94	245,3	1443,7	0,21	0,00
4	19915975,57	19915975,57	272903,9	5726845,5	216,21	0,00
5	24509052,51	24526038,83	9539063,4	106198467,9	8158,83	0,05
6	37861353,80	37940461,42	18055039,9	151957358,0	21150,08	0,24
7	57130358,18	57410478,50	16431267,4	186889331,5	36000,00	0,52
8	63383477,37	64385675,93	4670051,0	192192471,2	36000,00	1,66
9	74568540,60	76123361,38	2626539,3	99121195,8	36000,00	2,07
10	90382661,67	92483516,03	1638111,0	59830040,0	36000,00	2,43
11	113971417,90	117535041,20	794500,3	39268722,7	36000,00	2,77
12	244506955,60	253990179,10	286938,8	3836138,4	36000,00	3,88

Şekil 4.9 problem setlerinin her biri için çözülen 10 adet probleme ait ortalama çözüm süreleri ve yüzde sapma değerlerini göstermektedir. Problem boyutu arttıkça çözüm süreleri üssel olarak artış göstermiştir. Kaynak kullanımı 10 saatle sınırlandırıldığından CPU süreleri 7. problem seti ve daha büyük boyutlu problemlerde 36000 saniyede sabitlenmiş, yüzde sapma değerleri ise problem boyutu arttıkça yükselmiştir. Şekil 4.10 problem setleri için elde edilen amaç fonksiyonu ve karşılanamayan talepten dolayı katlanılan ceza maliyetlerinin ortalama değerlerini göstermektedir. Problem boyutunun artmasıyla birlikte katlanılan ceza maliyetleri artmasına rağmen, sistemin kârlılığı da artış göstermiştir. Toplam kârlılık ve ceza maliyetleri problem boyutlarının artmasıyla genel bir artış eğilimi gösterebilir de, farklı problem setleri için ceza maliyetleri ve toplam kârın birlikte incelenmesi sonucu ceza maliyetlerinin daha az arttığı noktalarda kârın daha fazla, ceza maliyetlerinin daha fazla arttığı noktalarda ise kârın daha az artış gösterdiği gözlenmiştir.



Şekil 4.9. Problem setleri için ortalama CPU zamanları ve yüzde sapma değerleri



Şekil 4.10. Problem setleri için ortalama kâr ve ceza maliyetleri

5. GENETİK ALGORİTMA

5.1. Genetik Algoritma ve Temel Kavramları

1975 yılında Holland tarafından ortaya atılan Genetik Algoritma (GA), Darwin'in canlı organizmalar için kurduğu Evrim teorisi üzerine kurulmuştur [Öztürk, 2008]. GA'nın amacı en iyi olanın hayatta kalması ilkesine dayanan evrim sürecinin modellenerek gerçek dünya problemlerine uygulanmasını sağlamaktır [Tuğ, 2005]. GA, doğada geçerli olan en iyinin yaşaması kuralına dayanarak sürekli iyileşen çözümler üretirken, iyi çözümün ne olduğunu belirleyen bir uygunluk fonksiyonu ve yeni çözümler üretmek için çaprazlama ve mutasyon gibi operatörleri kullanır. GA'nın bir diğer önemli özelliği de bir grup çözümle uğraşmasıdır. Bu sayede çok sayıda çözümün içinden iyiler seçilip kötüler elenebilir [Kuruca, 2009]. GA'nın uygulanmasının en uygun olduğu problemler, geleneksel yöntemler ile çözümü mümkün olmayan ya da çözüm süresi problemin büyüklüğü ile üssel orantılı olarak artan (NP-Zor) problemlerdir [Kuruca, 2009].

GA'da kullanılan temel kavramlar aşağıda verilmiştir:

Gen: Kromozomu oluşturmak için sıralanmış her bir değişkene “gen” adı verilir. Gen kendi başına anlamlı genetik bilgiyi taşıyan en küçük genetik yapıdır [Kuruca, 2009].

Kromozom: GA'daki karşılığı bireydir. Genlerin birleşerek oluşturduğu dizidir. Kromozomlar belli bir kodlama sistemiyle oluşturulur ve aday çözümleri gösterirler [Öztürk, 2008].

Genotip: GA'daki karşılığı bireyin gen yapısıdır. Aday çözüm olan kromozomların içindeki belirli gen gruplarına genotip denir [Öztürk, 2008].

Fenotip: Alternatif çözüm kümesidir. Genotipin deşifre edilerek asıl değerini belirlenmiş halidir [Altay, 2007].

Allel: Genlerin alabildiği değişik değerlerin kümesidir [Altay, 2007].

Lokus: Genin kromozomdaki pozisyonudur [Altay, 2007].

Popülasyon: Kromozomların bir araya gelerek oluşturduğu çözüm topluluğudur. Genellikle algoritma boyunca popülasyon sayısı sabit tutulur. Bu sayı çoğunlukla 10 ila 100 arasında değişir [Altay, 2007].

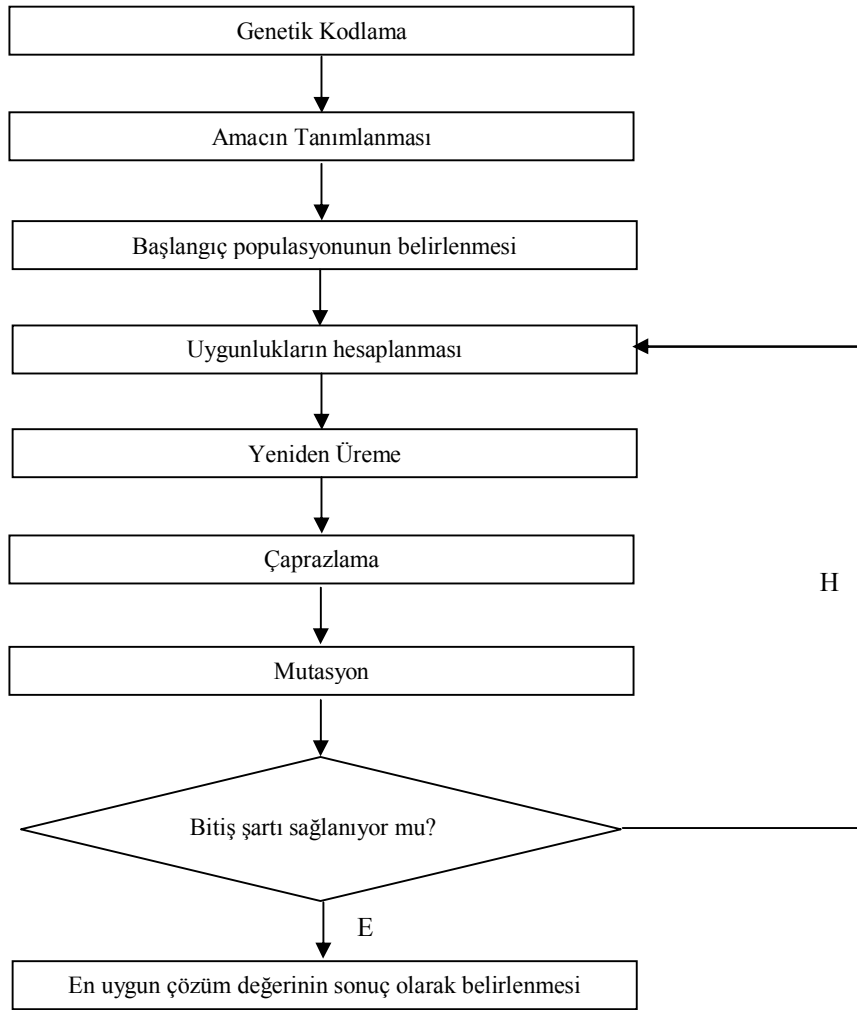
Uygunluk Fonksiyonu: GA'daki amaç fonksiyonudur. Bireyin hayatta kalma durumunu yani uyumunu gösteren değerdir. Yüksek değerler bireyin hayatta kalma olasılığının daha yüksek olduğunu belirtir [Öztürk, 2008].

Seleksiyon: GA'daki seçim işlemidir. Popülasyon içinden hayatta kalacak canlıların seçilmesidir [Öztürk, 2008].

5.2. Genetik Algoritmanın Aşamaları

Genel bir GA geliştirme aşamaları Şekil 5.1'de verilmiştir. Herhangi bir evrimsel algoritmanın ilk adımı problemde aday sonucun nasıl gösterileceğine karar verilmesidir. Bu adım genotipin belirlenmesini ve genotipin fenotipe haritalanmasını içerir [Kuruca, 2009]. Kodlama, GA'nın çok önemli bir kısmını oluşturmaktadır. İyi bir genetik yapının oluşması iyi bir kodlamayla sağlanabilir [Şeker, 2007]. GA geliştirilirken kullanılan kodlama türleri aşağıda verilmiştir.

İkili kodlama: İkili kodlamada, her kromozom bit (0 veya 1) karakter dizilerinden oluşmaktadır. İkili kodlama ilk olarak Holland tarafından kullanılmıştır. Diğer kodlama yöntemlerine göre basit ve anlaşılır olması bu tip kodlamanın çok tercih edilmesine neden olmaktadır [Bağış, 1996].



Şekil 5.1. Genetik algoritma adımları [Altay, 2007]

Permütasyon kodlama: Permütasyon kodlamada kromozomlar ilgili karakterin sıralamadaki konumunu belirten sayı dizisinden oluşur [Şeker, 2007].

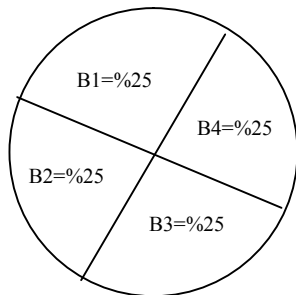
Değer kodlama: Reel sayılar gibi karmaşık değerlerin kullanıldığı problemlerde doğrudan değer kodlanması kullanılabilir [Kuruca, 2008].

Ağaç kodlama: Bu kodlama türünde kromozomlar fonksiyonlar gibi bazı nesnelerin ağaçlarından meydana gelmektedir [Şeker, 2007].

Genetik kodlamanın yapılmasından sonra elde edilen çözüm kümesinde bulunan çözümlerin iyi olup olmadığının neye göre değerlendirileceğini belirlemek amacıyla amaç fonksiyonunun tanımlanması gerekmektedir [Altay, 2007].

Başlangıç popülasyonunun belirlenmesi aşamasında ise algoritmada kullanılacak bireyler (ebeveynler) oluşturulur [Altay, 2007]. Burada yapılacak seçim başlangıç popülasyonundaki birey sayısıdır. Az sayıda birey, algoritmada kullanılabilecek birçok değerin işlenmeden atlanmasına neden olur. Bunun nedeni çaprazlamanın az sayıda birey arasında gerçekleşmesi ve çeşitliliğin daha az olmasıdır. Çok sayıda birey ise algoritmanın yavaşlamasına neden olur. Burada, her döngüde (nesil) daha çok birey incelenir. Belirli bir değerden sonra popülasyon sayısını daha fazla arttırmak algoritmanın verimliliğini azaltmaktadır. Her problem tipi için en iyi çözümün başlangıç popülasyonu sayısı farklıdır. Nesiller boyunca popülasyon sayısı genellikle korunur [Altay, 2007]. Başlangıç popülasyonunun oluşturulmasında bir sayı üretici tarafından rasgele üretilmiş olası çözümler ya da problem için belirli koşul ve kısıtları karşılayan olası çözümler kullanılabilir [Gündoğdu, 2007].

Başlangıç popülasyonunun belirlenmesinin ardından çözümün kalitesini gösteren uygunluk fonksiyonu hesaplanır [Bağış, 1996]. Daha sonra doğadaki doğal seleksiyon işleminin GA'da uygulanması için yeniden üreme işlemi yapılır [Altay, 2007]. Yeniden üreme operatörünün uygulanabilmesi için öncelikle deterministik birey seçme, rastgele birey seçme, rulet tekerleği, turnuva seçimi gibi yöntemler kullanılarak ebeveyn seçme işlemi gerçekleştirilir. Deterministik birey seçme yönteminde belirli sayıda en iyi olan bireyler yeni popülasyona aktarılır. Rastgele birey seçme yöntemi ise Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Örnekte, 1. bireyin uygunluk fonksiyonu değeri 45, 2. bireyin 21, 3. bireyin 9, 4. bireyin 75 olarak alınmıştır.



Birey 1: $f(x)=45$

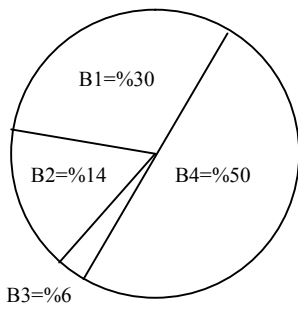
Birey 2: $f(x)= 21$

Birey 3: $f(x)= 9$

Birey 4: $f(x)=75$

Şekil 5.2. Rastgele birey seçme yöntemi

Rulet tekerleği yönteminde, deterministik yöntemin aksine her bireyin uygunluk derecesi arttıkça yeni popülasyona aktarılma şansı da artmaktadır. Şekil 5.3'te rulet tekerleği yöntemine göre bireylerin seçilme olasılıkları gösterilmiştir. Her birey için bu olasılık değerleri belirlendikten sonra rassal sayı aralıkları belirlenir. Birey sayısı kadar üretilen rassal sayılara karşılık gelen kromozomlar yeni bireyler olarak seçilir.



Birey 1: $f(x)=45$

Birey 2: $f(x)=21$

Birey 3: $f(x)=9$

Birey 4: $f(x)=75$

Birey 1: $45/(21+75+9+45)=\%30$

Birey 2: $21/(21+75+9+45)=\%14$

Birey 3: $9/(21+75+9+45)=\%6$

Birey 4: $75/(21+75+9+45)=\%50$

Şekil 5.3. Rulet tekerleği yöntemi

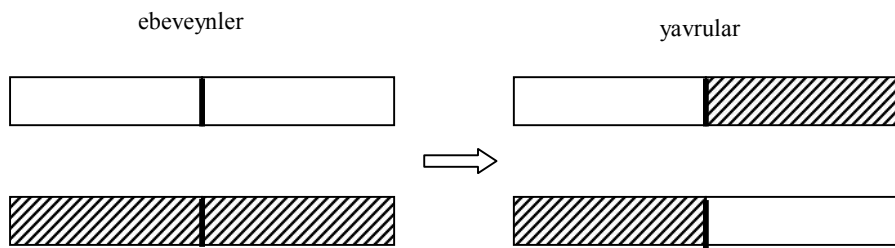
Sıralı seçim yönteminde kromozomlar uygunluk değerine göre azalacak şekilde sıralanır. Bu sıralamaya göre olasılıklar belirlenir ve rassal sayı üretilerek yeni nesilde hangi bireylerin olacağı belirlenir [Altay, 2007]. Birey seçmede sıklıkla kullanılan bir diğer yöntem de turnuva seçimi yöntemidir. Bu yöntemde, rastgele seçilen iki bireyden uygunluk derecesi yüksek olan birey bir sonraki popülasyona aktarılır.

En güçlü bireyin bir sonraki nesilde kesin olarak yer almasını sağlamak için elitizm yöntemi kullanılır [Altay, 2007]. Denge durumu seçim yöntemi ise bir zaman biriminde popülasyonun tamamının değiştirilmesinden, büyük bir kısmının yeni nesilde hayatta kalmasına dayanmaktadır.

GA'nın en önemli adımlarından birisi çaprazlama aşamasıdır. Ebeveynlerin genlerinin yerini değiştirerek yavru kromozomlar üretmek ve böylece var olan uygunluk değeri yüksek kromozomlardan uygunluk değeri daha yüksek olan kromozomlar elde etmek amacıyla çaprazlama operatörü uygulanır [Kuruca, 2009]. Çaprazlama yapılacak konum rasgele seçilir. Oluşan yeni birey ebeveynlerinin bazı

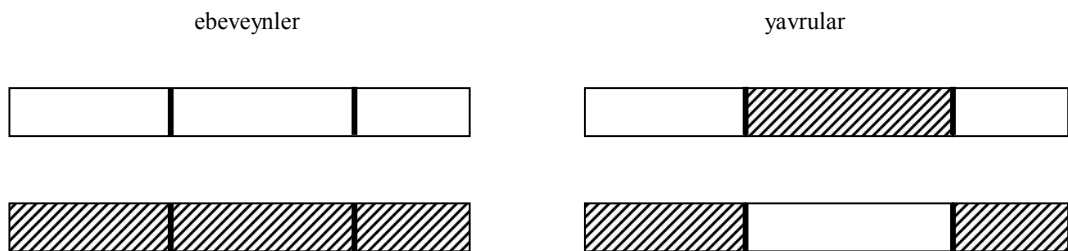
özelliklerini almış ve bir bakıma her iki ebeveynin kopyası olmuştur. Popülasyonda ne oranda bir çaprazlamaya izin verileceği çaprazlama oranı (p_c) ile belirlenir [Şeker, 2007]. Literatürde problemin türüne göre, geliştirilen sezgiselin optimuma yaklaşma derecesini artırabilmek amacıyla pek çok farklı çaprazlama operatörü kullanılmıştır. Bunlardan tek ve çok noktalı çaprazlama ile kes-ekle çaprazlama aşağıda açıklanmıştır.

Tek noktalı çaprazlamada, kromozom üzerinde rassal bir nokta seçilir ve seçilen noktanın sağında kalan kısımların yer değiştirmesiyle çocuklar elde edilir. Şekil 5.4 tek noktalı çaprazlama sürecini göstermektedir.



Şekil 5.4. Tek noktalı çaprazlama

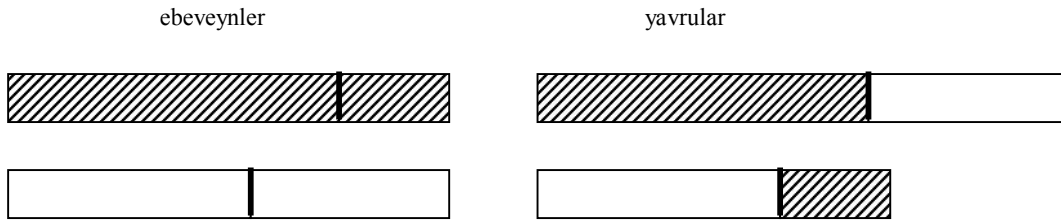
Çok noktalı çaprazlamada benzer şekilde rassal olarak birden fazla nokta belirlenir ve bu noktalar arasında yer alan genlerin yer değiştirmesiyle çocuklar oluşur. Şekil 5.5 iki noktalı çaprazlama sürecini göstermektedir.



Şekil 5.5. İki noktalı çaprazlama

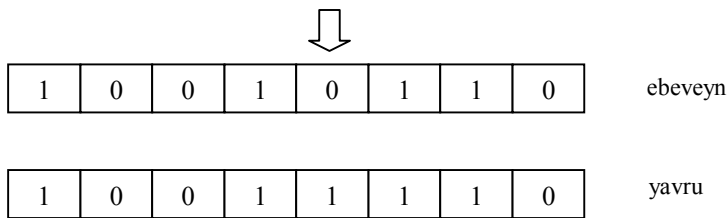
GA geliştirilirken kullanılan çaprazlama tekniklerinden bir diğeri de kes ekle çaprazlamadır. Ebeveyn 1’de rassal bir çaprazlama noktası seçilir, daha sonra Ebeveyn 2’de rassal bir çaprazlama noktası seçilir. Son olarak birinci ve ikinci

ebeveynde çaprazlama noktasının sağında kalan genler değiştirilerek çocuklar oluşturulur [Altay, 2007].



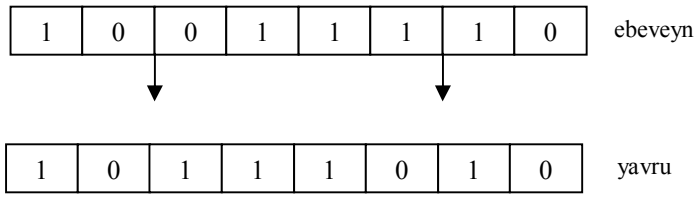
Şekil 5.6. Kes-Ekle çaprazlama

Mevcut kromozomdaki bir ya da birden fazla genin değiştirilmesi temeline dayanan mutasyon işlemi belirli bir süre sonra kromozomların birbirlerini tekrarlama durumunu önlemek ve çeşitliliği artırmak amacıyla uygulanır [Kuruca, 2009]. Popülasyonda ne oranda mutasyona izin verileceği mutasyon oranı (p_m) ile belirlenir. Literatürde uygulanan birçok farklı mutasyon operatörü vardır. En sık kullanılan mutasyon operatörlerinden bazılarının uygulamaları Şekil 5.7-5.10'da gösterilmiştir. Basit mutasyon yönteminde kromozomun bir geni rassal olarak seçilir ve alleliyle değiştirilir [Altay, 2007].



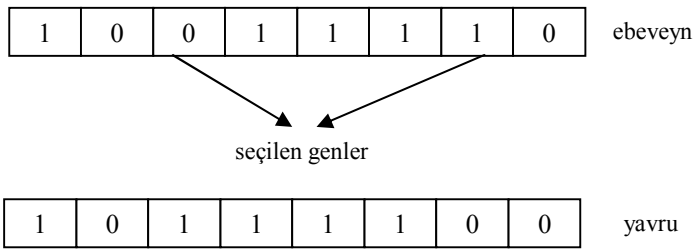
Şekil 5.7. Basit mutasyon

Değiştirme mutasyonunda kromozom üzerinde rassal olarak iki nokta seçilir ve bu noktalar arasında kalan değerler ters çevrilir [Altay, 2007].



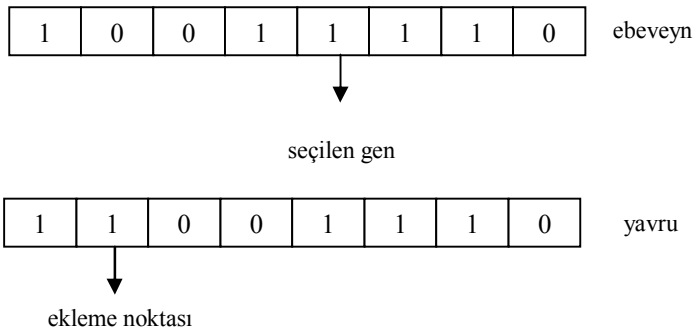
Şekil 5.8. Değiştirme mutasyonu

Ters çevrilen kısmın kromozom içerisinde rassal olarak yerleştirilmesiyle oluşan farklı bir mutasyon yöntemi daha bulunmaktadır. Karşılıklı değişim mutasyonunda ise kromozomdan rassal olarak seçilen iki genin karşılıklı yerleri değiştirilir, aradaki genler aynı kalır.



Şekil 5.9. Karşılıklı değişim mutasyonu

Araya yerleştirme mutasyonunda, kromozomdan rassal olarak seçilen bir gen yine rassal olarak belirlenen bir noktaya eklenir [Altay, 2007].



Şekil 5.10. Araya yerleştirme mutasyonu

Sonuç olarak, GA geliştirilirken önceden belirlenen iterasyon sayısının ya da sürenin sınırlandırılması gibi şartlara bağlanan bitiş kriterinin sağlanmasıyla elde edilen en iyi çözüm aynı zamanda problemin de çözümü olarak belirlenir.

Belirli bir problem türü için geliştirilen GA'da kromozom yapısının oluşturulmasından başlangıç popülasyonunun belirlenmesi, popülasyon sayısı, uygulanan seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörü türleri, çaprazlama ve mutasyon oranları ile bitiş kriterinin belirlenmesine kadar pek çok faktör çözüm yönteminin performansını etkilemekte ve problemin yapısına göre farklı uygulamalar farklı performanslar sergileyebilmektedir.

6. MELEZ ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Tesislerin açılıp/açılmama kararlarının alındığı çok aşamalı lojistik problemleri NP-Zor sınıfına girmektedir [Gen ve ark., 2006]. Bu türde problemlerin çözümü için son yıllarda genellikle evrimsel algoritmaların kullanımı ön plana çıkmıştır.

Literatürde melezleme tipleri, iki sezgiselin melezlenmesi ve bir sezgisel ile kesin çözüm veren algoritmanın melezlenmesi şeklinde iki kısımda incelenmektedir [Bouabda ve ark., 2011]. İleri yönlü çok aşamalı tedarik zinciri ağı tasarımı için sezgisel çözüm yöntemi ile doğrusal programlamayı melezleyen çalışmalar [Yeh, 2006; Keskin ve Uster, 2007; Altıparmak ve ark., 2009] tarafından yapılmıştır. Yeh sezgisel çözüm yöntemi olarak memetik algoritmayı kullanırken, Keskin ve Uster dağınık arama algoritmasını, Altıparmak ve arkadaşları ise GA'yı kullanmışlardır. Bu tezde müşterilerden dönen ürünlerin tersine akışını ele alan bir ağ yapısı için yeni bir karma tamsayılı matematiksel model formüle edilmiştir. Geliştirilen modelin çözümü için doğal seçim ilkelerine dayanan bir arama ve optimizasyon yöntemi olan ve 1975 yılında Holland tarafından ortaya atılan GA ile GAMS-Cplex'in birlikte kullanıldığı melez bir yöntem önerilmiştir. GA'nın kullanılmasıyla çözüm uzayının tamamı yerine belirli bir kısmını tarayacak etkin arama ile daha kısa sürede sonuca ulaşılması hedeflenmiştir. GA, bir problemin çözümü için çok farklı şekillerde uygulanabilmektedir [Altıparmak ve ark., 2009]. Bu tezde, Denge Durumu Genetik Algoritması (steady state GA-ssGA) uygulanmıştır. Geleneksel GA'ya alternatif olarak ortaya çıkan ssGA'nın mantığı bir zaman biriminde popülasyonun tamamının değiştirilmesinden bir kısmının değiştirilmesine dayanmaktadır. ssGA geliştirmede kullanılan kaba kod aşağıda verilmiştir [Luke, 2011]:

- 1: $pop_boyut \leftarrow$ istenen popülasyon büyüklüğü
- 2: $P \leftarrow \{\}$
- 3: **for** pop_boyut kadar **do**
- 4: $P \leftarrow P \cup \{\text{yeni rassal çözüm}\}$
- 5: $En_iyi \leftarrow \square$
- 6: **for** her bir çözüm için $P_i \in P$ **do**

```

7:   Hesapla Uygunluk ( $P_i$ )
8:   if  $En\_iyi = \square$  or  $Uygunluk(P_i) > Uygunluk(En\_iyi)$  then
9:        $En\_iyi \leftarrow P_i$ 
10: repeat
11:   Ebeveyn  $P_a \leftarrow$  Ebeveyn seç ( $P$ )
12:   Ebeveyn  $P_b \leftarrow$  Ebeveyn seç ( $P$ )
13:   Çocuklar  $C_a, C_b \leftarrow$  Çaprazla( $(P_a), (P_b)$ )
14:    $C_a \leftarrow$  Dönüştür( $C_a$ )
15:    $C_b \leftarrow$  Dönüştür( $C_b$ )
16:   Uygunluğu Hesapla( $C_a$ )
17:   if  $Uygunluk(C_a) > Uygunluk(En\_iyi)$  then
18:        $En\_iyi \leftarrow C_a$ 
19:   Uygunluğu hesapla( $C_b$ )
20:   if  $Uygunluk(C_b) > Uygunluk(En\_iyi)$  then
21:        $En\_iyi \leftarrow C_b$ 
22:   Çözüm  $P_d \leftarrow$  Çıkartmak için seç( $P$ )
23:   Çözüm  $P_e \leftarrow$  Çıkartmak için seç( $P$ )  $P_d \neq P_e$ 
24:    $P \leftarrow P - \{P_d, P_e\}$ 
25:    $P \leftarrow P \cup \{C_a, C_b\}$ 
26: until  $En\_iyi$  istenilen sonuç olana kadar ya da bitirme şartı sağlanana kadar
27: return  $En\_iyi$ 

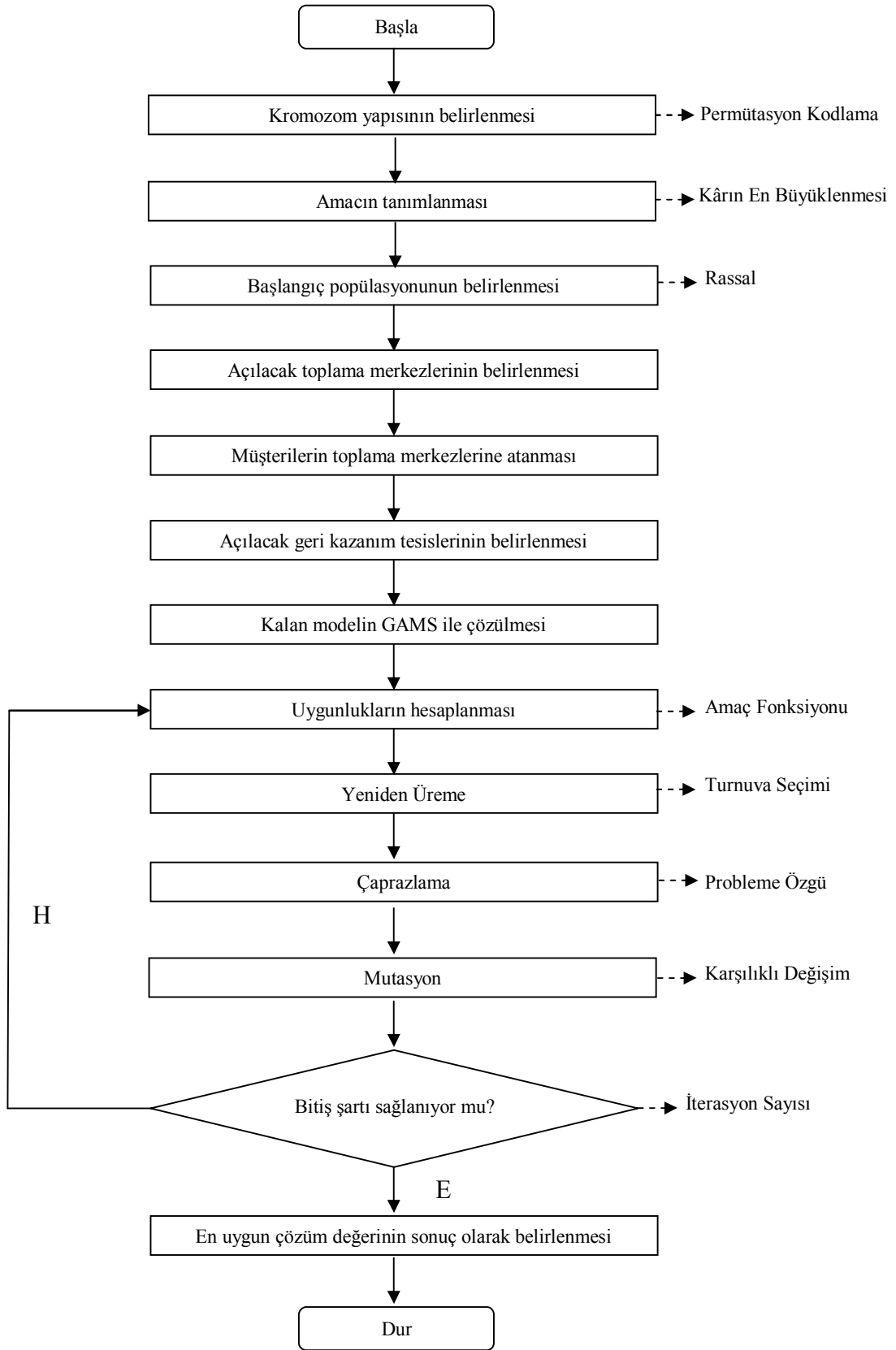
```

Yöntemin işleyişi şu şekilde olmaktadır: Öncelikle popülasyon büyüklüğüne karar verilir. Başlangıç popülasyonu rassal olarak belirlenebildiği gibi belirli bir yaklaşımla da elde edilebilir. Elde edilen en iyi çözümü temsil eden “En_iyi” vektörü başlangıç değerine eşitlenir, her bir kromozomun (çözümün) uygunluk değeri hesaplanır, hesaplanan uygunluk değeri o zamana kadar elde edilen “En_iyi” çözümün uygunluk değerinden daha iyiye “En_iyi” güncellenir. Tüm kromozomlar için bu işlem yapılır. Daha sonra, belirlenen seçim mekanizması kullanılarak (turnuva seçimi, rulet tekerleği vb.) yavruları üretmek üzere ebeveynler (P_a, P_b) seçilir. Çaprazlama operatörü kullanılarak ebeveynler çaprazlanır, mutasyon operatörü kullanılarak dönüştürme yapılır ve böylece çocuklar elde edilmiş olur. Elde

edilen çocuklar (C_a , C_b) için uygunluk değeri hesaplanır. Çocuk a'nın uygunluk değeri "En_iyi"den iyi ise "En_iyi" güncellenir. Aynı şekilde, Çocuk b'nin uygunluk değeri "En_iyi"den iyi ise "En_iyi" güncellenir. Popülasyondaki iki kromozom (P_d , P_e) yerlerini çocuklara bırakmak üzere belirlenir, bunlar popülasyondan çıkarılır, çocuklar popülasyona eklenir. Bu işlem optimum sonuca ulaşana ya da bitiş kriteri sağlanana kadar tekrarlanır. Bitiş kriteri sağlandığında elde edilen çözüm aynı zamanda problemin de çözümünü vermektedir. Uygulanan melez çözüm yönteminin aşamaları Şekil 6.1'de verilmiştir.

GA'nın dayandığı temel bileşenlerin (kromozomların genetik gösterimi, başlangıç popülasyonunun oluşturulması, herhangi bir çözümün kalitesini ölçmek için belirlenen uygunluk fonksiyonu, genetik operatörler gibi) ve uygulanan çözüm yönteminin ayrıntıları aşağıda anlatılmıştır.

Problemin çözümü için kromozom yapılarının oluşturulması aşamasında permütasyon kodlama kullanılmıştır. Geliştirilen kromozomun uzunluğu, aday toplama merkezi sayısı, müşteri sayısı ve aday geri kazanım tesisi sayısının toplamı kadar olacak şekilde ($n+m+r$) belirlenmiştir. Permütasyon kodlama kullanıldığından genler birbirinden farklı tamsayılardan oluşmaktadır. Ele alınan kromozom yapısı 3 kısımdan oluşmaktadır (Şekil 6.2). İlk kısım aday toplama merkezlerini, ikinci kısım müşterileri, üçüncü kısım ise aday geri kazanım tesislerini belirtmektedir. Genlerin kromozomdaki pozisyonu (lokus) geri kazanım ağındaki düğümleri ifade etmektedir. Genlerin değerleri ise 1 ile ($n+m+r$) aralığında rassal olarak belirlenmiştir. Bu değerler modelde atanma önceliğinin ve açılacak olan toplama merkezleri ile geri kazanım tesislerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 6.1. Melez çözüm yöntemi

1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3
5	8	16	13	7	4	10	14	6	15	3	9	11	1	12	2

Şekil 6.2. Kromozom yapısı

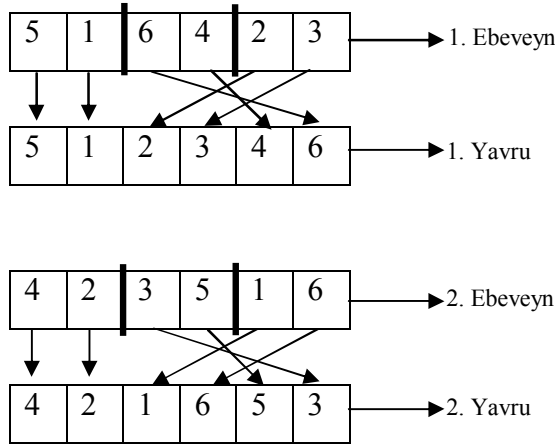
Uygunluk değeri amaç fonksiyonu olarak belirlenmiş ve sistem kârının en büyüklenmesi şeklinde ele alınmıştır. Başlangıç popülasyonu rassal olarak oluşturulmuştur. Kromozomdan çözüm üretilmesi aşamasında ilk olarak açılacak olan toplama merkezleri bilgisi elde edilmektedir. Bunun için, öncelikle tüm müşterilerden geri dönen toplam kullanılmış ürün miktarı ($\sum R_m$) hesaplanmaktadır. Daha sonra kromozomdaki en büyük değerli toplama merkezinden başlayarak açılan toplama merkezlerinin kapasiteleri ($\sum CAP_n$) toplam geri dönen ürün miktarını sağlayana ya da aşana kadar toplama merkezleri açılmaktadır. Aynı süreç açılacak geri kazanım tesislerinin belirlenmesi için de işlemektedir.

Açılacak olan toplama merkezleri belirlendikten sonra müşterilerin toplama merkezlerine atanması problemi çözülmektedir. Müşterilerin toplama merkezlerine atanması kromozomda en büyük değerli müşteriden başlanarak yapılmaktadır. Seçilen müşteri açılan toplama merkezlerinden kendisine en yakın olana atanmakta ve toplama merkezinin kapasitesi güncellenmektedir. Bu işlem tüm müşteriler toplama merkezlerine atanana kadar devam etmektedir.

Müşterilerin toplama merkezlerine atanması ile hangi toplama merkezlerinin ve geri kazanım tesislerinin açılacağı belirlenmesi işlemlerinin sezgisel algoritma ile elde edilmesi sonucu geliştirilen kapasite kısıtlı, çok aşamalı, karma tamsayılı matematiksel modelin karmaşıklığı azalacaktır. Basite indirgenmiş problemin Lingo, Cplex gibi optimizasyon yazılım paketleriyle çözümü daha kolay olacak ve kısa sürelerde optimuma yakın sonuçlar elde edilecektir.

Geliştirilen ssGA'da; yeni popülasyonu oluşturacak bireylerin seçimi için turnuva seçimi metodu kullanılmıştır. Kapsamlı olarak yapılan denemeler sonucunda popülasyon sayısı 25, iterasyon sayısı ise 100 olarak belirlenmiştir. Seçilen bireylerin

tamamına çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanmıştır. Probleme özgü olarak geliştirilen çaprazlama süreci Şekil 6.3’de gösterilmiştir. İlk olarak kromozomda birbirine eşit olmayan 2 adet rassal kesme noktası belirlenmektedir. İlk ebeveynin, birinci kesme noktasına kadar olan genleri ve 2. kesme noktasından sonraki genleri birinci çocuğa ard arda aktarılmaktadır. Kesme noktaları arasında kalan genler ise birinci çocuğa aktarılırken 2. ebeveyndeki sıra bilgisi kullanılmaktadır. Aynı şekilde ikinci çocuk oluşturulurken de 2. Ebeveynin 1. kesme noktasına kadarki kısmı ve 2. kesme noktasından sonraki kısmı 2. çocuğa aktarılmakta, kesme noktaları arasında kalan genler için ise 1. Ebeveyndeki sıra bilgisi kullanılmaktadır. Mutasyon aşamasında karşılıklı değişim mutasyonu kullanılmıştır.



Şekil 6.3. Uygulanan çaprazlama operatörü

Çaprazlama ve mutasyon operatörleri kullanılarak elde edilen çocuklar popülasyondaki en kötü 2 bireyle yer değiştirmiştir. Bitiş kriteri olarak belirlenen iterasyon sayısının sağlanmasıyla birlikte elde edilen en iyi amaç problemin çözümü olarak değerlendirilmiştir.

6.1. Çözüm Yönteminin Örnek Problem Üzerinde Gösterimi

Bölüm 4.3’te ele alınan örnek problem için çözüm yöntemin işleyişi aşağıda anlatılmıştır. Çizelge 6.1 örnek problem için müşteriler ve toplama merkezleri arasındaki uzaklıkları, toplama merkezi kapasitelerini ve müşterilerden dönen ürün

miktarlarını göstermektedir. Çizelge 6.2 örnek problem için geri kazanım tesisi kapasitelerini ve toplama merkezleri ile geri kazanım tesisleri arası uzaklıkları göstermektedir.

Çizelge 6.1. Müşteri ve toplama merkezi parametreleri

Müşteri (m)	Geri Dönen Ürün Miktarları (R_m)	Toplama Merkezlerine Uzaklıklar (d_{mn})					
		1	2	3	4	5	6
1	4409	852	982	522	764	738	337
2	6167	208	742	266	137	707	401
3	9205	953	131	894	996	655	117
4	8490	210	618	499	441	905	584
5	6385	448	350	748	185	594	861
6	4146	901	898	513	253	346	366
7	5594	771	203	545	345	886	585
8	8105	990	866	950	246	184	819
9	5818	685	259	161	154	930	793
10	7516	912	450	426	817	378	926
11	6757	177	415	169	594	450	860
12	4208	147	839	248	837	661	608
13	8380	952	599	412	526	249	140
14	5943	397	178	492	454	991	145
15	4255	668	442	505	481	189	235
16	4665	850	653	341	906	479	202
17	6358	693	993	551	292	416	619
18	9235	812	473	544	829	478	122
19	5214	403	594	596	405	290	953
20	4105	565	684	564	906	863	784
Toplama Merkezi Kapasite (Cap_n)		47065	46758	47816	45144	46688	46283

Çizelge 6.2. Toplama ve geri kazanım tesisi parametreleri

Toplama Merkezleri	Geri Kazanım Tesislerine Uzaklık (d_{nr})		
	1	2	3
1	259	576	170
2	455	606	353
3	513	485	501
4	829	212	231
5	921	930	537
6	877	504	494
Geri Kazanım Tesisi Kapasite (CAP_r)		259317	250699

Çizelge 6.1 ve 6.2’de verilen parametreler kullanılarak geliştirilen çözüm yöntemi için ilk olarak kromozom yapısının oluşturulması gerekmektedir. Şekil 6.4’de 6 adet aday toplama merkezi (n), 20 adet müşteri (m) ve 3 adet aday geri kazanım tesisi (r) içeren örnek problem için rassal olarak oluşturulan bir kromozom yapısı verilmiştir.

n						m																				r		
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	1	2	3
4	22	6	8	12	21	28	10	23	7	27	2	15	11	29	5	3	16	17	14	9	18	1	13	20	19	24	26	25

Şekil 6.4. Örnek problem için kromozom yapısı

İlk olarak geri dönen toplam ürün miktarı hesaplanmaktadır. Örnek için $\sum R_m = 124955$ olarak bulunmuştur. Daha sonra kromozomdaki en büyük değer alan toplama merkezinden başlayarak bu miktar karşılanana ya da aşılana kadar açılacak olan toplama merkezleri belirlenmektedir. Örnekte sırasıyla 2, 6 ve 5 numaralı tesislerin açılmasına karar verilmiştir. Açılan toplama merkezlerinin kapasitesi 139729 olarak hesaplanmış ve bu noktada geri dönen ürün miktarını karşılayabilecek konuma gelmiştir. Bundan sonra problem müşterilerin bu açılan toplama merkezlerine atanmasıdır. Müşteriler yine kromozom yapısındaki en büyük değeri alandan başlayarak açılan toplama merkezlerinden kendisine en yakın mesafede olana atanmakta ve her atama yapıldığında toplama merkezi kapasitesi güncellenmektedir. Kromozomdan müşterilerin toplama merkezlerine atanma sırası bilgisi 9, 1, 5, 3, 19, 20, 16, 13, 12, 7, 14, 18, 8, 2, 15, 4, 10, 11, 6, 17 şeklinde elde edilmiştir. 9 numaralı müşteriden geri dönen ürün miktarı 5818 birim, bu müşterinin açılan 2, 6 ve 5 numaralı toplama merkezlerine uzaklıkları ise sırasıyla 259, 793 ve 930 kilometredir. Bu durumda 9 numaralı müşteri kendisine en yakın olan 2 numaralı tesise ürünlerini göndereceğinden 2 numaralı tesisin kapasitesi $46758-5818=40940$ şeklinde güncellenir. Tüm müşteriler toplama merkezlerine atanana kadar bu işlem devam ettirilir. Sonuç olarak elde edilen atamalar Şekil 6.5’de toplu halde verilmiştir.

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
n	6	5	6	2	2	5	2	5	2	5	2	6	6	6	5	6	5	6	5	2

Şekil 6.5. Müşterilerin atandığı toplama merkezleri

Açılacak olan toplama merkezleri ve müşterilerin bunlardan hangilerine atanacaklarının belirlenmesiyle sıra açılacak olan geri kazanım tesisinin belirlenmesine gelmiştir. Burada toplama merkezlerinin açılmasında kullanılan sezgisel yaklaşım aynen tekrarlanmaktadır. Kromozomda en büyük değere sahip geri kazanım tesisinden başlayarak toplam geri dönen ürün miktarı karşılanana ya da aşılana kadar geri kazanım tesislerinin açılmasına devam edilmektedir. Örnekte 2 numaralı geri kazanım tesisi en büyük değeri aldığından (Şekil 6.4) ilk olarak o açılacaktır. 2 numaralı geri kazanım tesisinin kapasitesi 250699 birimdir. Bu değer toplam geri dönen ürün miktarını karşıladığından herhangi başka geri kazanım tesisi açılmasına gerek yoktur. Toplama merkezlerindeki ürünlerin tamamı 2 numaralı geri kazanım tesisine taşınacaktır.

Açılacak olan toplama ve geri kazanım tesislerinin belirlenmesi ve müşterilerin toplama merkezlerine atanmasıyla geri kalan problem GAMS-Cplex ile modellenerek çözülmekte ve daha kısa sürelerde çözüm elde edilmektedir. Çizelge 6.3’de farklı sayıda ikincil pazar, müşteri, toplama merkezi ve geri kazanım tesisinden oluşan ve her biri 10’ar tane örnek problem içeren problem setleri için elde edilen ortalama sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 6.3’de yer alan fark sütunu, GAMS’in verdiği üst sınır değeri ve sezgisel çözüm yönteminden elde edilen amaç fonksiyonu değeri kullanılarak aşağıdaki biçimde hesaplanmıştır:

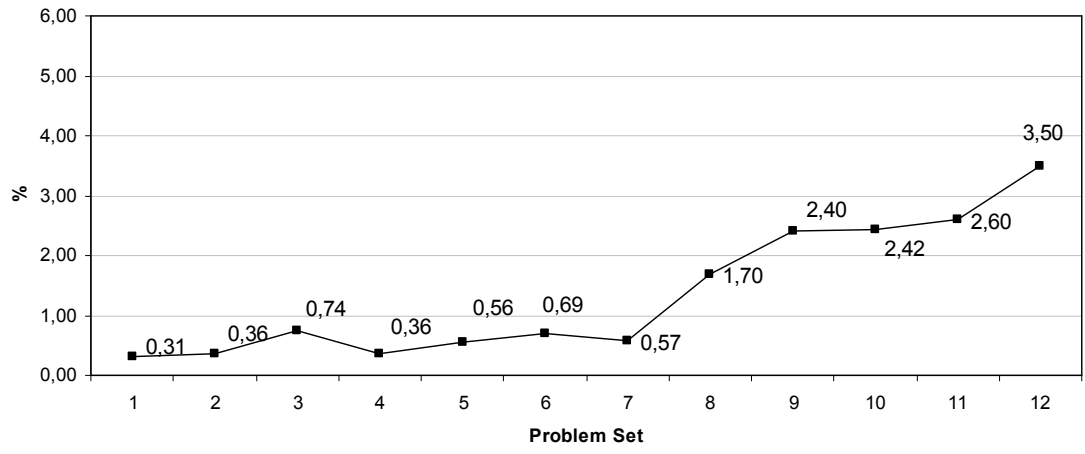
$$\%Fark = \frac{GAMS(\text{Üst Sınır}) - ssGA}{GAMS} * 100 \quad (6.1)$$

Çizelge 6.3. Geliştirilen sezgisel çözüm yöntemi ile GAMS-Cplex sonuçlarının karşılaştırılması

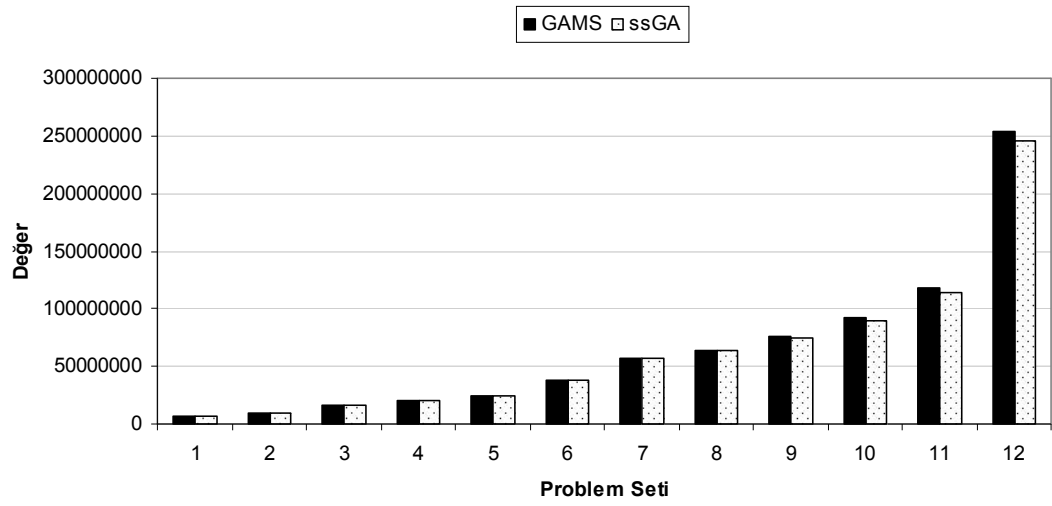
No	Problem Seti	GAMS-Cplex		ssGA		
		Üst Sınır	CPU Zamanı (sn)	Amaç Fonksiyonu (AF)	CPU Zamanı (sn)	Fark (%)
1	2-10-5-2	6744201,038*	0,070	6722993,245	44,7	0,31
2	3-15-5-2	9730419,178*	0,098	9695809,598	44,6	0,36
3	4-20-6-3	15845257,94*	2,059	15728207,26	44,3	0,74
4	5-30-8-3	19915975,57*	216,214	19845140,43	45,2	0,36
5	8-40-10-3	24526038,83*	8158,832	24388392,22	46,4	0,56
6	10-50-15-5	37940461,42*	21150,079	37677600,72	47,5	0,69
7	15-75-20-5	57410478,5	>36000	57084390,6	52,8	0,57
8	20-100-25-5	64385675,93	>36000	63293143,6	64,2	1,70
9	30-150-40-8	76123361,38	>36000	74296869,0	99,8	2,40
10	40-200-50-10	92483516,03	>36000	90241887,24	142,0	2,42
11	50-250-60-10	117535041,2	>36000	114477808,37	200,0	2,60
12	100-500-120-20	253990179,1	>36000	245094735,1	856,6	3,50
* Optimal Çözüm						

GAMS ile optimum çözüm elde edilebilen 50 müşteriye kadarki ilk 6 problem seti için optimum çözümle geliştirilen çözüm yönteminden elde edilen sonuçlar arasındaki farklılık 0,0031 ile 0,0074 arasında değişmiştir.

Şekil 6.6 ve 6.7’de her bir problem seti içerisinde çözülen 10 adet farklı problem için ssGA ve GAMS’den elde edilen sonuçların ortalamaları arasındaki farklar gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde geliştirilen sezgisel yaklaşımın oldukça iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. 100 adet ikincil pazar, 500 adet müşteri, 120 adet toplama merkezi ve 20 adet geri kazanım tesisinden oluşan en büyük boyutlu problem seti için GAMS ve geliştirilen çözüm yöntemi sonuçları arasındaki fark %3,5 olmuştur. Bu durum çözüm yönteminin makul sürelerde oldukça iyi performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 6.6. GAMS ve ssGA'dan elde edilen sonuçlar arasındaki % farklar



Şekil 6.7. GAMS ve ssGA'dan elde edilen sonuçlar

7. SONUÇ

Günümüzde üreticilere doğal kaynakların korunması ve çevre kirliliğinin önlenmesi için kullanılmış ürünlerin geri kazanımına yönelik büyük sorumluluklar yüklenmektedir. Firmaların bilinçli müşteri beklentilerini karşılayarak pazar paylarını koruma ya da genişletme çabaları ve hükümetlerin yapmış oldukları düzenlemelerin yanı sıra geri dönen ürünün taşıdığı ekonomik değer de ürün geri kazanımına olan ilgiyi artıran önemli unsurlardan biridir. Kullanılmış ürünleri müşterilerden toplamak, taşımak, yeniden işlemek ve uygun şekilde bertaraf etmekle yükümlü üreticilerin bütün bu tersine süreci etkili yönetebilmesi için uygun tersine lojistik ağının tasarımı ilk adımdır. Ürün geri kazanımının söz konusu olduğu sistemlerde geleneksel ileri sistemlerden farklı olarak dönen ürünün kalitesi, ürünün izleyeceği rota, uygulanacak geri kazanım seçeneği, dönüş zamanı ve miktarı gibi mevcut belirsizlikler ağ tasarımı ve yönetilmesini daha zor hale getirmektedir. Bu tezde açılacak olan tersine lojistik ağına özgü tesislerin yerleri, sayıları, toplama merkezlerinin müşterilerden topladıkları ürün miktarları ve tesisler arası taşınan hayat çevrimini tamamlamış ürün ve parça miktarlarını en iyilemek amacıyla çok aşamalı, kapasite kısıtlı, karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiş ve çözülmüştür. Modelde literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, sistem kârını artırabilmek ya da yasal yükümlülükleri yerine getirebilmek amacıyla daha fazla ürün geri dönüşünü teşvik etmek üzere müşterilere dönen ürün miktarına bağlı olarak “artırımsal teşvik” uygulandığı durumda toplam sistem kârı en iyilenmeye çalışılmıştır. Model, geleneksel tesis yer seçimi ve atama problemi yapısında geliştirilmiştir. Problem NP-Zor yapıda olduğundan ve bu tür problemlere karmaşık yapıları nedeniyle geleneksel çözüm yöntemleri ile kısa sürelerde çözüm alınması mümkün olamayacağından Denge Durumu Genetik Algoritması ile GAMS-Cplex’in melezlendiği bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Tezde ayrıca modelin farklı durumlardaki davranışlarının analiz edilebilmesi amacıyla talep miktarları, geri dönen ürün miktarları ve kabul oranları ile ilgili senaryolar üretilerek model bu senaryolar altında çözülmüştür. Her bir senaryo için elde edilen amaç fonksiyonu değeri, toplam taşıma maliyeti ve karşılanamayan parça talepleri için katlanan ceza maliyetleri değerlendirilmiştir. Diğer taraftan teşvik uygulamalarındaki

değişikliklerin modele etkisinin incelenebilmesi için de farklı senaryolar geliştirilmiş ve model bu senaryolar için çözülmüştür. Farklı boyutlarda üretilen 12 problem setinin her biri için aynı yapıya sahip 10'ar adet örnek problem çözülmüş ve geliştirilen çözüm yönteminin performansı GAMS-Cplex'den elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Geliştirilen çözüm yöntemi hem çözüm süresi hem de çözüm kalitesi açısından oldukça iyi performans sergilemiş ve 12 problem seti için GAMS-Cplex ve melez çözüm yönteminden elde edilen sonuçlar arasındaki farklılıklar %0,31 ile %3,5 aralığında değişmiştir.

KAYNAKLAR

Ahluwalia, P.K., Nema, A.K., “Multi-objective reverse logistics model for integrated computer waste management”, *Waste Management and Research*, 24: 514-527 (2006).

Aksen, D., Aras, N., Karaarslan, A.G., “Design and analysis of government subsidized collection systems for incentive-dependent returns”, *International Journal of Production Economics*, 119(2): 308–327 (2009).

Altay, A., “Genetik algoritma ve bir uygulama”, Yüksek lisans tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 9-24 (2007).

Altıparmak, F., Gen, M., Lin, L., Karaoğlu, İ. “A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design”, *Computers & Industrial Engineering*, 56: 521–537 (2009).

Alumur, S.A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Verter, V., “Multi-period reverse logistics network design”, *European Journal of Operational Research*, 220: 67–78 (2012).

Ammons, J.C., Realff, M.J., Newton, D., “Reverse Production System Design and Operation for Carpet Recycling”, Work paper, *Georgia Institute of Technology*, (1997).

Aras, N., Aksen, D., “Locating collection centers for distance and incentive-dependent returns”, *International Journal of Production Economics*, 111: 316-333 (2008).

Aras, N., Aksen, D., Tanuğur, A.G., “Locating collection centers for incentivized returns under a pick-up policy with capacitated vehicles”, *European Journal of Operational Research*, 191(3): 1223–1240 (2008).

Assavapoke, T., Wayuparb, P., Yao, H., “Reverse Logistics Network Design for Electronic Products in the State of Texas”, *Technical Report at the University of Houston*, September, 1-30 (2006).

Bağış, A., “Genetik Algoritma kullanılarak ders programının optimum şekilde düzenlenmesi”, Yüksek lisans tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 6-7 (1996).

Barros, A.I., Dekker, R., Scholten, V.A., “A Two-level Network for Recycling Sand: A Case Study”, *European Journal of Operational Research*, 110: 199–214 (1998).

Beamon, B.M., Fernandes, C., “Supply-Chain Network Configuration for Product Recovery”, *Production Planning and Control*, 15(3): 270-281 (2004).

Berger, T., Debaillie, B., “Location of disassembly centres for re-use to extend an existing distribution network”, Yüksek lisans tezi, *University of Leuven*, Belgium (1997).

Bouabda, R., Jarboui, B., Eddaly, M., Rebai, A. “A branch and bound enhanced genetic algorithm for scheduling a flowline manufacturing cell with sequence dependent family setup times”, *Computers & Operations Research*, 38: 387-393 (2011).

Brito, M.P., Dekker, R., “Reverse Logistics-A Framework”, *Econometric Institute Report EI 2002-38*, *Erasmus University Rotterdam*, The Netherlands, 1-19 (2002).

Brito, M.P., Flapper, S.D.P., Dekker, R., “Reverse Logistics: A Review of Case Studies”. *Econometric Institute Report EI 2002-21*, *Erasmus University Rotterdam*, The Netherlands, 1-32 (2002).

Brundtland, G., “Our Common Future: the World Commission on Environment and Development”, *Oxford: Oxford University Press* (1987).

Chen, H.K., Chou, H.W., Chiu, Y.C., “On the modeling and solution algorithm for the reverse logistics recycling flow equilibrium problem”, *Transportation Research Part C*, 15(4): 218–234 (2007).

Chouinard, M., D’Amours, S., Aït-Kadi, D., “Design of reverse logistics networks for multi-product, multi-state, and multi-processing alternatives”, In: Jung H, Chen F, Jeong B (eds.), *Trends in Supply Chain Design and Management: Technologies and Methodologies*. *Springer*, 181-211 (2007).

Cruz-Rivera, R., Ertel, J., “Reverse logistics network design for the collection of End-of-life vehicles in Mexico”, *European Journal of Operational Research*, 196: 930-939 (2009).

Das, K., Chowdhury, A.H., “Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning”, *International Journal of Production Economics*, 135: 209–221 (2012).

De Figueiredo, J. N., Mayerle, S.F., “Designing minimum-cost recycling collection networks with required throughput”, *Transportation Research Part E*, 44(5): 731–752 (2008).

Demirel, N.Ö., Gökçen, H., “A Mixed Integer Programming Model for Remanufacturing in Reverse Logistics Environment”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39: 1197-1206 (2008a).

Demirel, N.Ö., Gökçen, H., “Geri kazanımlı imalat sistemleri için lojistik ağı tasarımı: literatür araştırması”, *GÜMMFD*, 23(4): 903-912 (2008b).

Dowlatshahi, S., “A strategic framework for the design and implementation of remanufacturing operations in reverse logistics”, *International Journal of Production Research*, 43(16): 3455–3480 (2005).

Du, F., Evans G.W., “A Bi-objective Reverse Logistics Network Analysis for Post-sale Service”, *Computers and Operations Research*, 35: 2617-2634 (2008).

Fandel, G., Stammen, M., “A General Model for Extended Strategic Supply Chain Management with Emphasis on Product Life Cycles Including Development and Recycling”, *International Journal of Production Economics*, 89(3): 293-308 (2003).

Fleischmann, M., “Quantitive models for reverse logistics”, Doktora tezi, *Erasmus University Rotterdam*, Rotterdam, 22-26, 55-62, 65-91, 166-170 (2000).

Fleischmann, M., “Reverse logistics network structures and design”, Erim Report Series Research In Management ERS-2001-52-LIS, *Erasmus University Rotterdam, The Netherlands*, 1-21 (2001).

Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J.M., van Wassenhove, L., “The impact of product recovery on logistics network design”, *Production and Operations Management*, 10(2): 156-173 (2001).

Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J.A.E.E., van Wassenhove, L.N., “Quantitative models for reverse logistics: a review (Invited Review)”, *European Journal of Operational Research*, 103(1): 1-17 (1997).

Fleischmann, M., Krikke, H.R., Dekker, R., Flapper, S.D.P., “A characterization of logistics network for product recovery”, *Omega: The International Journal of Management Science*, 28(6): 653-666 (2000).

Gen, M., Altıparmak, F., Lin, L. “A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding”, *OR Spectrum*, 28(3): 337–354 (2006).

Gomes, M.I., Barbosa-Provoa, A.P., Novais, A.Q., “Modelling a recovery network for WEEE: A case study in Portugal”, *Waste Management*, 31: 1645–1660 (2011).

Guide, V.D.R., Jayaraman, V., Srivastava, R., Benton, W.C., “Supply chain management for recoverable manufacturing systems”, *Interfaces*, 30(3): 125-142 (2000).

Gündoğdu, E.Ö., “Veri madenciliğinde genetik algoritmalar”, Yüksek lisans tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 44-65 (2007).

Hammond, D., Beullens, P., “Closed-loop supply chain network equilibrium under Legislation”, *European Journal of Operational Research*, 183(2): 895–908 (2007).

Harsa, E.E., “Reverse logistics: theory and practices – with focus on Remanufacturing applications”, Yüksek lisans tezi, *Galatasaray Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İstanbul, 18-22 (2010).

Hu, T.L., Sheu, J.B., Huang, K.H. “A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes”, *Transportation Research. Part E*, 38(6): 457–473 (2002).

Jayaraman, V., Guide, V.D.R., Srivastava, R., “A closed-loop logistics model for remanufacturing”, *Journal of the Operational Research Society*, 50(5): 497-508 (1999).

Jayaraman, V., Patterson, R.A., Rolland, E., “The Design of Reverse Distribution Networks: Models and Solution Procedures”, *European Journal of Operational Research*, 150(2): 128-149 (2003).

Kannan, G., Sasikumar, P., Devika, K. “A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling”, *Applied Mathematical Modelling*, 34: 655-670 (2010).

Kara, S., Rugrungruang, F., Kaebernick, H., “Simulation modelling of reverse logistics network”, *International Journal of Production Economics*, 106: 61-69 (2007).

Keskin, B.B., Uster, H. “A scatter search-based heuristic to locate capacitated transshipment points”, *Computers & Operations Research*, 34 (10): 3112–3125 (2007).

Kim, K., Song, I., Kim, J., Jeong, B., “Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment”, *Computers & Industrial Engineering*, 51: 279–287 (2006).

Ko, H.J., Evans, G.W., “A Generic Algorithm-based Heuristic for the Dynamic Integrated Forward/Reverse Logistics Network for 3PL’s”, *Computers and Operations Research*, 34: 346-366 (2007).

Köse, S., “Tersine lojistik ve atık kızırtma yağları geri kazanım ağı tasarımı”, Yüksek lisans tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 41 (2009).

Krikke, H.R., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Van Wassenhove, L.N., “Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators”, *International Journal of Production Research*, 41(16): 3689–3719 (2003).

Krikke, H.R., van Harten, A., Schuur, P.C., “Business case Océ: Reverse logistic network re-design for copiers”, *OR Spektrum*, 21(3): 381-409 (1999).

Kroon, L., Vrijens, G., “Returnable Containers: An Example of Reverse Logistics”, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 25(2): 56-68 (1995).

Kuruca, E., “Gezgin satıcı problemi tabanlı bir sistemin dinamik bulanık genetik algoritmalar ile optimizasyonu”, Yüksek lisans tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 5-25 (2009).

Kusumastuti, R.D., Piplani, R., Lim, G.H., “An Approach to Design Reverse Logistics Networks for Product Recovery”, *Engineering Management Conference*, 2004 IEEE International, 3: 1239- 1243 (2004).

Le Blanc, H.M., Fleuren, H.A., Krikke, H.R., “Redesign of a recycling system for LPG-tanks”, *OR Spectrum*, 26(2): 283–304 (2004).

Lee, D.H., Dong, M., “A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery”, *Transportation Research Part E*, 44: 455–474 (2008).

Lee, D.H., Dong, M., “Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty”, *Transportation Research Part E*, 45(1): 61–71 (2009).

Lee, J.E., Gen, M., Rhee, K.G., “Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm”, *Computers & Industrial Engineering*, 56: 951–964 (2009a).

Lee, J.E., Gen, M., Rhee, K.G., “Hybrid Priority-based Genetic Algorithm for Multi-stage Reverse Logistics Network”, *IEMS*, 8(1): 14-21 (2009b).

Lee, J.E., Rhee, K.G., Lee, H.H., “Multiobjective Hybrid Genetic Algorithm for Reverse Logistics Network Design of Inventory systems with Backordering”, *2010 IEE International Conference*, 7-10 December, 2318-2322 (2010).

Lieckens, K., Vandaele, N., “Reverse Logistics Network Design with Stochastic Lead Times”, *Computers and Operations Research*, 34: 395-416 (2007).

Listes, O., “A decomposition approach to a stochastic model for supply-and-return network design”, Working paper, Econometric Institute, Erasmus School of Economics, *The Erasmus University Rotterdam*, Rotterdam, 1-27 (2002).

Listeş, O., “A Generic Stochastic Model for Supply-and-Return Network Design”, *Computers and Operations Research*, 34: 417-442 (2007).

Listeş, O., Dekker, R., “A Stochastic Approach to a Case Study for Product Recovery Network Design”, *European Journal of Operational Research*, 160: 268-287 (2005).

Louwers, D., Kip, B.J., Peters, E., Souren, F., Flapper, S.D.P., “A Facility Location Allocation Model for Reusing Carpet Material”, *Computers and Industrial Engineering*, 36(4): 855–869 (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).

Lu, Z., Bostel, N., Dejax, P., “Simple Plant Location Problem with Reverse Flow”, Supply Chain Optimisation Product/Process Design Facility Location and Flow Control, 94, Panos M. Pardalos, Donald W. Hearn (Editors), *Springer*, USA, 151-166 (2005).

Luke, S., “Essentials of Metaheuristics”, Lecture notes, Department of Computer Science, *George Mason University*, First Edition, 45 (2011).

Marin, A., Pelegrin, B., “The return plant location problem: Modeling an resolution”, *European Journal of Operational Research*, 104: 375-392 (1998).

Min H., Ko H.J., “The Dynamic Design of a Reverse Logistics Network from the Perspective of Third-party Logistics Service Providers”, *International Journal of Production Economics*, 113: 176-192 (2007).

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 (2006a).

Min, H., Ko, C.S., Ko, H.J., “The spatial and temporal consolidation of returned products in a closed-loop supply chain network”, *Computers & Industrial Engineering*, 51: 309–320 (2006b).

Nagurney, A., Toyasaki, F., “Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium framework for re-cycling”, *Transportation Research Part E*, 41(1): 1–28 (2005).

Özgün, N., “Yeniden imalat sistemleri için bütünleşik lojistik ağı tasarımı ve bir karma tamsayılı programlama modeli”, Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 44-52 (2007).

Öztürk, M., “Çok aşamalı tedarik zinciri optimizasyonu probleminin yayılan ağaç tabanlı genetik algoritma ile çözümü”, Yüksek lisans tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 52-70 (2008).

Paksoy, T., Bektaş, T., Özceylan, E., “Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain”, *Transportation Research Part E*, 47: 532–546 (2011).

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

Pati, R.K., Vrat, P., Kumar, P., “A goal programming model for paper recycling system”, *Omega*, 36: 405-417 (2008).

Pishvae, M.S., Farahani, R.Z., Dullaert, W., “A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design”, *Computers & Operations Research*, 37: 1100–1112 (2010).

Pishvae, M.S., Kianfar, K., Karimi, B., “Reverse logistics network design using simulated annealing”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47: 269-281 (2010).

Pishvae, M.S., Torabi, S.A., “A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty”, *Fuzzy Sets and Systems*, 161: 2668–2683 (2010).

Pochampally, K.K., Gupta, S.M., “A Multi-phase Mathematical Programming Approach to Strategic Planning of an Efficient Reverse Supply Chain Network”, *Proceedings of the IEEE International Symposium on the Electronics and the Environment*, 72-78 (2003).

Quin, Z., Ji, X., “Logistics network design for product recovery in fuzzy environment”, *European Journal of Operational Research*, 202: 479–490 (2010).

Realf, M. J., Ammons J.C., Newton, D., “Robust reverse production system design for carpet recycling”, *IIE Transactions*, 36(8): 767–776, (2004).

Sahyouni, K., Savaskan, C., Daskin, M., “A facility location model for bidirectional Flows”, *Transportation Science*, 41(4): 484–499 (2007).

Salema M.I.G., Pova, A.P.B., Novais, A.Q., “A Warehouse-based Design Model for Reverse Logistics”, *Journal of the Operational Research Society*, 57: 615-629 (2006).

Salema M.I.G., Pova, A.P.B., 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).

Salema, M. I., Pova A.P.B., Novais A.Q., “A strategic and tactical model for closed-loop supply chains”, *OR Spectrum*, 31(3): 573–599 (2009).

Savaskan, C., “Closed-Loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing”, *Management Science*, 50(2): 239–252 (2004).

Schultmann, F., Engels, B., Rentz, O., “Closed-loop Supply Chains for Spent Batteries”, *Interfaces*, 33(6): 57-71 (2003).

Sheu, J.B., “A coordinated reverse logistics system for regional management of multi-source hazardous wastes”, *Computers and Operations Research*, 34: 1442-1462 (2007).

Shi, L., Fan, H., Gao, P., Zhang, H. “Network Model and Optimization of Medical Waste Reverse Logistics by Improved Genetic Algorithm”, *'09 Proceedings of the 4th International Symposium on Advances in Computation and Intelligence*, 40-52 (2009).

Shi, J., Zhang, G., Sha, J., “Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return”, *Computers & Operations Research*, 38: 641–650 (2011).

Shih, L.S., “Reverse Logistics System Planning for Recycling Electrical Appliances and Computers in Taiwan”, *Resources, Conservation and Recycling*, 32: 55-72 (2001).

Sim, E., Jung, S., Kim, H., Park, J., “Generic Network Design for a Closed-Loop Supply Chain Using Genetic Algorithm”, K. Deb et al. (Eds.): GECCO 2004, LNCS 3103, *Springer*, Berlin, 1214–1225 (2004).

Spengler, T., Puncher, H., Penkuhn, T., Rentz, O., “Environmental integrated production and recycling management, *European Journal of Operational Research*, 308-326 (1997).

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

Şeker, Ş., “Araç rotalama problemleri ve zaman pencereli stokastik araç rotalama problemine genetik algoritma yaklaşımı”, Yüksek lisans tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 81-87 (2007).

Tang Q., Xie, F., “A Genetic Algorithm for Reverse Logistics Network Design”, *Third International Conference on Natural Computation*, 4: 277-281 (2007).

Thierry M.C., “An Analysis of the Impact of Product Recovery Management on Manufacturing Companies”, Doktora Tezi, *Erasmus University*, Rotterdam (1997).

Thierry, M., Salomon, M., van Wassenhove L., “Strategic issues in product recovery management”, *California Management Review*, 37(2): 114-35 (1995).

Tibben-Lembke, R., Rogers, D.S., “Differences between forward and reverse logistics in a retail environment”, *Supply Chain Management: An International Journal*, 7(5): 271-282 (2002).

Tuğ, E., “Genetik Algoritmalar İle Tıbbi Veri Madenciliği”, Yüksek lisans tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 4, (2005).

Üster, H., Easwaran, G., Akçali, E., Çetinkaya, S., “Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed loop supply chain network design model”, *Naval Research Logistics*, 54(8): 890-907 (2007).

Wang, C.H., Even, J.C., Adams, S.K. “A mixed-integer linear model for optimal processing and transport of secondary materials”, *Resources, Conservation Recycling*, 15: 65-78 (1995).

Wang, Z., Yao D.Q., Huang, P., “A new location-inventory policy with reverse logistics applied to B2C e-markets of China”, *International Journal of Production Economics*, 107: 350–363 (2007).

Yang, G., Ning, S., Li, Q., “Genetic Local Search for Facility Location-Allocation Problem in Closed-Loop Supply Chains”, *The 1st International Conference on Information Science and Engineering (ICISE2009)*, 4316-4319 (2009a).

Yang, G.F., Wang, Z.P., Li, X.Q., “The optimization of the closed-loop supply chain network”, *Transportation Research*, 45: 16–28 (2009b).

Yeh, W.C. “A efficient memetic algorithm for multi-stage supply chain network problem”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29 (7-8): 803–813 (2006).

Yimsiri, S., “Designing multi-objective reverse logistics networks using genetic algorithms”, Doktora tezi, *The University of Texas at Arlington*, Virginia, 8-9 (2009).

Zarei, M., Mansour, Z., Kashan, A.H., Karimi, B., “Designing a Reverse Logistics network for End-of-Life Vehicles Recovery”, *Mathematical Problems in Engineering*, 1-16 (2010).

Zhou, Y., Wang, S., “Generic model of reverse logistics network design”, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(3): 71–78 (2008).

EKLER

EK-1 Test problemleri çözüm sonuçları

Çizelge 1.1. 2-10-5-2 boyutlu problem seti için elde edilen sonuçlar

No	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı (sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	9670389,56	9670389,56	0	52	0,062	0
2	2689484,9	2689484,9	48	258	0,093	0
3	6409864,73	6409864,73	8	154	0,078	0
4	9684487,33	9684487,33	2	76	0,078	0
5	6342778,08	6342778,08	0	128	0,093	0
6	5733838,28	5733838,28	7	195	0,046	0
7	2345053,81	2345053,81	0	144	0,062	0
8	10422508,23	10422508,23	1	112	0,062	0
9	9455803,46	9455803,46	1	47	0,046	0
10	4687802,0	4687802,0	0	128	0,078	0
Ort.	6744201,038	6744201,038	6,7	129,4	0,070	0

Çizelge 1.2. 3-15-5-2 boyutlu problem seti için elde edilen sonuçlar

No	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı (sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	16444065,1	16444065,1	0	114	0,046	0
2	5870838,16	5870838,16	60	340	0,125	0
3	10911367,28	10911367,28	4	115	0,015	0
4	6991110,35	6991110,35	4	197	0,109	0
5	14491016,53	14491016,53	0	91	0,093	0
6	16159097,34	16159097,34	113	1439	0,187	0
7	10149611,2	10149611,2	96	645	0,125	0
8	7355429,26	7355429,26	0	159	0,093	0
9	3483016,32	3483016,32	0	186	0,078	0
10	5448640,24	5448640,24	38	294	0,109	0
Ort.	9730419,178	9730419,178	31,5	358	0,098	0

EK-1 (Devam) Test problemleri çözüm sonuçları

Çizelge 1.3. 4-20-6-3 boyutlu problem seti için elde edilen sonuçlar

No	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı (sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	15024329,41	15024329,41	118	1074	0,203	0
2	10333375,16	10333375,16	85	505	0,156	0
3	12692709,14	12692709,14	163	1896	0,250	0
4	18337723,20	18337723,20	80	632	0,140	0
5	19109447,34	19109447,34	1570	8594	0,781	0
6	22505961,86	22505961,86	0	114	0,062	0
7	19258323,68	19258323,68	0	138	0,062	0
8	19955797,48	19955797,48	0	189	0,093	0
9	10711182,54	10711182,54	162	689	0,218	0
10	10523729,54	10523729,54	275	606	0,156	0
Ort.	15845257,94	15845257,94	245,30	1443,70	0,212	0

Çizelge 1.4. 5-30-8-3 boyutlu problem seti için elde edilen sonuçlar

No	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı (sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	24605237,84	24605237,84	3	136	0,125	0
2	12341312,98	12341312,98	483291	2413722	222,828	0
3	21120560,23	21120560,23	15502	273372	11,265	0
4	22404756,37	22404756,37	7	183	0,093	0
5	23449761,09	23449761,09	349675	643765	144,421	0
6	10970962,68	10970962,68	36	737	0,125	0
7	22010852,40	22010852,40	48	436	0,109	0
8	24362819,02	24362819,02	25189	139477	10,656	0
9	26098612,14	26098612,14	155	689	0,312	0
10	11794880,99	11794880,99	1855133	53795938	1772,203	0
Ort.	19915975,57	19915975,57	272903,9	5726845,5	216,214	0

EK-1 (Devam) Test problemleri çözüm sonuçları

Çizelge 1.5. 8-40-10-3 boyutlu problem seti için elde edilen sonuçlar

No	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı (sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	21232216,59	21232216,59	159	999	0,750	0
2	37281071,72	37438499,95	48921501	704789089	36000	0,4223
3	25557124,76	25557124,76	6164021	90517306	7781,421	0
4	43920773,83	43920773,83	21	360	0,218	0
5	36757115,79	36757115,79	16	292	0,187	0
6	37977483,36	37977483,36	15	183	0,140	0
7	4834940,21	4834940,21	1779	22946	2,343	0
8	3703269,85	3703269,85	24849	162212	19,796	0
9	16362752,84	16375187,76	37863611	235976589	36000	0,0760
10	17463776,19	17463776,19	2414662	30514703	1783,390	0
Ort.	24509052,51	24526038,83	9539063,4	106198467,9	8158,832	0,05

Çizelge 1.6. 10-50-15-5 boyutlu problem seti için elde edilen sonuçlar

No	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı (sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	48987237,84	48989360,56	40725825	229649162	36000	0,0043
2	18345515,96	18345515,96	5349	20356	6,140	0
3	24034731,89	24034731,89	173285	704617	158,937	0
4	19744955,36	19797794,14	12148369	358453244	36000	0,2676
5	51410800,74	51418742,04	25455354	173441648	36000	0,0154
6	26354231,82	26354231,82	15272	34910	15,750	0
7	35103568,67	35824631,96	28723640	289718982	36000	2,0541
8	53336554,68	53336554,68	30194267	103628014	23769,953	0
9	53877015,63	53877015,63	9831885	25380240	7549,765	0
10	47418925,40	47426035,55	33277153	338542407	36000	0,0150
Ort.	37861353,8	37940461,42	18055039,9	151957358	21150,079	0,24

EK-1 (Devam) Test problemleri çözüm sonuçları

Çizelge 1.7. 15-75-20-5 boyutlu problem seti için elde edilen sonuçlar

No	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı (sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	74201172,25	74203756,98	25991964	91253358	36000	0,0035
2	74620569,07	74635497,92	23146098	95424085	36000	0,0200
3	79603587,02	79615412,57	20384487	216418992	36000	0,0149
4	18565724,67	18654437,08	15965611	277049930	36000	0,4778
5	30388936,38	30515343,88	19155423	123892322	36000	0,4160
6	45716762,07	45836526,11	7162491	311616991	36000	0,2620
7	31096318,76	31337695,69	7402061	116485669	36000	0,7762
8	78973095,63	78974010,66	24802512	124401129	36000	0,0012
9	69195186,18	69220560,98	17303779	250613882	36000	0,0367
10	68942229,78	71111543,12	2998248	261736957	36000	3,1466
Ort.	57130358,18	57410478,5	16431267,4	186889331,5	36000	0,52

Çizelge 1.8. 20-100-25-5 boyutlu problem seti için elde edilen sonuçlar

No	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı (sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	41335384,34	42064527,13	5194912	241889268	36000	1,7640
2	70726257,23	72035376,86	6167528	165144051	36000	1,8510
3	33481825,26	34252502,23	2875340	215167491	36000	2,3018
4	67832897,38	69150030,34	1938110	115530265	36000	1,9417
5	97327863,40	97610504,47	5847141	225511030	36000	0,2904
6	72886305,78	75066699,64	8282489	248532417	36000	2,9915
7	66575097,05	67486994,96	5903178	195597275	36000	1,3697
8	62069624,02	63331292,12	899683	188092993	36000	2,0327
9	59753708,83	59817583,78	3225258	121581293	36000	0,1069
10	61845810,42	63041247,77	6366871	204878629	36000	1,9329
Ort.	63383477,37	64385675,93	4670051	192192471,2	36000	1,66

EK-1 (Devam) Test problemleri çözüm sonuçları

Çizelge 1.9. 30-150-40-8 boyutlu problem seti için elde edilen sonuçlar

No	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı (sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	60154898,64	61371460,03	967794	133309985	36000	2,0224
2	57298301,86	58272375,79	4028232	68583812	36000	1,7000
3	100846083,43	101625162,16	1759809	126987973	36000	0,7725
4	55670840,20	57277306,69	3763725	47329336	36000	2,8857
5	100657511,80	104992863,46	3038914	119934408	36000	4,3070
6	55019286,99	55716764,77	3210723	93853266	36000	1,2677
7	68703973,88	71061461,25	3379242	68982175	36000	3,4314
8	39199497,72	39777572,40	2810021	132332962	36000	1,4747
9	103380519,54	104975640,22	2878056	77596373	36000	1,5430
10	104754491,93	106163007,04	428877	122301668	36000	1,3446
Ort.	74568540,6	76123361,38	2626539,3	99121195,8	36000	2,07

Çizelge 1.10. 40-200-50-10 boyutlu problem seti için elde edilen sonuçlar

No	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı (sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	43776792,88	44640217,16	2308458	34356701	36000	1,9723
2	85160079,43	88245104,09	1636480	48505055	36000	3,6226
3	85556831,09	87011545,16	840925	104009505	36000	1,7003
4	140608246,34	143631550,08	127434	97045949	36000	2,1502
5	90643064,26	94144183,43	3826939	4359057	36000	3,8625
6	200562144,46	203707960,71	1607268	62057172	36000	1,5685
7	123009313,28	126369903,09	984657	93534654	36000	2,7320
8	16869555,51	17282118,09	2410225	27137959	36000	2,4456
9	31022910,43	31876189,64	2091115	46480744	36000	2,7505
10	86617679,03	87926388,86	547609	80813604	36000	1,5109
Ort.	90382661,67	92483516,03	1638111	59830040	36000	2,43

EK-1 (Devam) Test problemleri çözüm sonuçları

Çizelge 1.11. 50-250-60-10 boyutlu problem seti için elde edilen sonuçlar

No	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı (sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	263313303,01	273011347,54	518859	48910952	36000	3,6831
2	60780209,27	62043208,01	862050	4710485	36000	2,0780
3	56737306,10	57780390,96	1593461	27832682	36000	1,8384
4	62577744,66	63863960,53	804725	53423003	36000	2,0554
5	36381047,50	37259753,87	1585129	15115797	36000	2,4153
6	176015784,99	181204869,02	715695	45830123	36000	2,9481
7	172909113,07	180833541,41	213780	62928823	36000	4,5830
8	102083009,91	105176519,47	531594	50819655	36000	3,0304
9	102928346,50	106043797,40	229783	24174282	36000	3,0268
10	105988314,21	108133023,41	889927	58941425	36000	2,0235
Ort.	113971417,9	117535041,2	794500,3	39268722,7	36000	2,77

Çizelge 1.12. 100-500-120-20 boyutlu problem seti için elde edilen sonuçlar

No	Alt Sınır	Üst Sınır	Düğüm Sayısı	İterasyon Sayısı	CPU Zamanı (sn)	Yüzde Sapma Değeri
1	197968966,10	204746199,36	196901	6424303	36000	3,4234
2	303641676,48	314337469,28	319953	2155177	36000	3,5225
3	276048344,85	285672744,59	369404	2873520	36000	3,4865
4	281838645,34	292296911,39	376338	971808	36000	3,7107
5	189048480,9	195384579,0	414815	2000529	36000	3,3516
6	211760037,23	222386731,87	372211	1301331	36000	5,0183
7	260856062,14	272644242,20	296444	4322693	36000	4,5190
8	336681995,37	350258842,68	292751	7221382	36000	4,0325
9	194527453,1	202506235,5	21809	3239243	36000	4,1016
10	192697894,9	199667835,6	208762	7851398	36000	3,617
Ort.	244506955,6	253990179,1	286938,8	3836138,4	36000	3,88

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DEMİREL Neslihan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 24.07.1983 Kayseri
Medeni hali : Evli
e-mail : neslihanozgun@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi /Endüstri Mühendisliği	2013
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Endüstri Mühendisliği	2007
Lisans	Erciyes Üniversitesi/ Endüstri Mühendisliği	2005
Lise	Sema Yazar Anadolu Lisesi	2001

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce