

ÇOK ÜRÜNLÜ GERİ DÖNÜŞÜM AĞI TASARIMI İÇİN BİR MATEMATİKSEL MODEL

Kemal Alaykiran^{1*}, Ertan Güner²

^{1*}Selçuk Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 42075 Selçuklu, Konya, kalaykiran@selcuk.edu.tr

²Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe, Ankara,
erguner@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 04.06.2012; Kabul/Accepted: 07.12.2012)

ÖZET

Geri dönüşüm, faydalı ömrünü doldurmuş ürünlerin imalatta tekrar kullanılabilir hammaddeye dönüştürülmesi süreci olup, tersine lojistik alanında uygulaması en fazla olan geri kazanım yöntemidir. Etkin bir geri dönüşüm ağı, ürünlerin müşterilerden toplanması, ayrıştırılması ve uygun bir tesiste geri dönüştürülmesi adımlarının izlendiği etkin bir tersine lojistik ağı tasarımı ile mümkündür. Bu çerçevede dikkate alınabilecek bir diğer konu da müşterilerden toplanan ürünlerin nasıl parçalanacaklarıdır. Bir ürünü en ince ayrıntısına kadar ayrıştırmak, harcanan işgücü açısından maliyetli olsa da elde edilen çıktı açısından karlıdır. Bir ürünün parçalanması için daha az kaynak kullanmak, elde edilecek olan geri dönüştürülebilir malzeme miktarının da azalmasına neden olacaktır. Bu çalışmada, çok ürünlü bir geri dönüşüm ağı birden çok malzeme tipi için incelenmiştir. İncelenen ağdaki her bir ürün birden fazla ayrıştırma yöntemine göre parçalanabilmekte ve her birinde elde edilen malzeme miktarı farklı olmaktadır. Çalışmada ortaya konulan problem tanımlanmış ve bu problemin çözülmesi için karma tamsayılı bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen matematiksel modelin etkinliği, farklı müşteri sayılarında küçük ve büyük boyutlu toplam 240 test problemi üzerinde incelenmiştir. Bu problemlerden, 103 tanesi için bir saatlik çözüm süresi içinde en iyi çözüm bulunmuştur. Geri kalan 137 problem için ise bir saatlik çözüm süresinde bulunan en iyi çözüm ile problem için belirlenen alt sınır değeri arasındaki fark belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, problemlerin çözüm süreleri dikkate alınarak farklı parametreler için değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tersine Lojistik, Geri Dönüşüm, Karma Tamsayılı Matematiksel Model

A MATHEMATICAL MODEL FOR MULTI-PRODUCT RECYCLING NETWORK DESIGN

ABSTRACT

Recycling may be defined as the process of transforming the end-of-life products into raw materials used in manufacturing, and it is the most applied recovery method in the field of reverse logistics. An efficient recycling network is possible only with an efficient reverse logistics network design where products are collected from customers, disassembled and recycled at an appropriate recycling facility. In this context, another issue to consider is how the products to be disassembled. Disassembling a product in detail is costly considering the workforce used but it is profitable due to the outcome. In this study, a multi-product recycling network is considered for multiple recoverable material types. Any product examined may be disassembled due to multiple disassembly schemes where the outcome of every scheme differs in quantity. The problem considered is defined in detail and a mixed integer mathematical model is proposed in order to solve the problem. A total of 240 test problems, small and large dimensioned, are generated and solved with a one-hour CPU time limit, in order to demonstrate the efficiency of the model. For the 103 out of 240 test problems the optimal solution is found and for the rest of the problems the difference between the best solution found in one hour and the lower bound found for the problem is determined. The results are analyzed for system parameters considering the CPU times.

Keywords: Reverse Logistics, Recycling, Mixed Integer Mathematical Modeling

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsan nüfusunun giderek artması ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi, ihtiyaçların karşılanması için üretim hacminin giderek büyümesi nedenleriyle doğal kaynaklar hızla tükenmektedir. Artan tüketime paralel olarak atık hacimleri de giderek artmaktadır. Yıllar boyu süregelen ekonomik kaygılar ile ucuz fakat çevreyi düşünmeyen üretim teknikleri sonucunda çevre kirliliği her geçen gün daha ciddi bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Tersine lojistik, faydalı ömürleri tükenen ürünlerin müşterilerden geri alınması ve tekrar değerlendirilerek faydalı hale getirilmesi süreci olarak özetlenebilir. Bu bağlamda, bu kavram, yaşadığımız yüzyılda rekabet avantajı elde etmek isteyen şirketler için yararlı ve önemli bir stratejik karar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Literatürde, tersine lojistik kavramının pek çok tanımı yapılmıştır. Fleischmann vd. [1]'de, tersine lojistik, kullanıcı için gerekli olmayan kullanılmış ürünün, pazarda yeniden kullanılabilir ürün haline getirilmesine kadarki tüm lojistik aktivitelerini kapsayan bir süreçtir şeklinde tanımlanmıştır. Bir tersine lojistik sisteminde müşteriden geri alınan ürünler çeşitli şekillerde faydalı hale getirilebilir. Bu işlemler, Thierry vd. [2]'de tamir, ürün yenileme, yeniden üretim, parça alma ve geri dönüşüm olarak sıralanmıştır. Geri alınan ürün üzerinde hangi işlem veya işlemlerin gerçekleştirileceği ürünün durumu ve tersine lojistik stratejisi ile belirlenir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Tersine lojistik literatüründe yapılan çalışmalar, Rubio vd. [3]'de üç ana başlık altında sınıflandırılmıştır. Bunlar, faydalı ömrünü tamamlamış ürünlerin yönetimi ve dağıtımı, üretim planlama ve stok yönetimi, tersine lojistikte tedarik zinciri yönetimi konularıdır. Bu çalışmada ele alınan problem, faydalı ömrünü tamamlamış ürünlerin yönetimi ve dağıtımı diğer bir deyişle de tersine lojistikte ağ tasarımı konusu içine girmektedir.

Louwens vd. [4]'de, halı artıklarının geri dönüşümü ile ilgili bir tersine lojistik ağ tasarımı yapılmıştır. Jayaraman vd. [5]'de, yeniden üretim yapan bir işletme için yeniden üretim / dağıtım tesislerinin yeri ve yeniden üretilmiş ürünler için optimal taşıma, üretim ve stoklama miktarlarını veren, 0-1 karma tamsayılı bir model geliştirilmiştir. Shih vd. [6]'da, Tayvan'da kullanılmış bilgisayarların geri alınması yönelik olarak hükümetin koyduğu bir yasaya değinilmiş ve bilgisayarların ve diğer donanımın geri alınması, geri dönüştürülmesi ve elde edilen malzemenin satışını dikkate alan karma tamsayılı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Sodhi ve Reimer [7]'de, elektronik ürünlerin geri dönüşümü için tersine lojistik kanalları incelenmiştir. Okumuro vd. [8]'de, ürün bileşenlerinin yeniden kullanımının doğal

kaynakları korumak adına etkili bir yol olduğunun altı çizilerek, bir yeniden üretim sistemi için stokastik, doğrusal olmayan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Beamon ve Fernandes [9]'da, kullanılmış ürünlerin toplanması, yeniden işlenmesi ve müşterilere dağıtılması işlemlerinin yapıldığı bir ürün geri kazanım ağı incelenmiştir. Sheu vd. [10]'da, ileri yönlü ve tersine lojistik faaliyetlerinin beraberce ele alındığı çok amaçlı bir doğrusal matematiksel model kurulmuştur. Min vd. [11]'de, bir e-ticaret şirketi için tüketicilerden geri dönen ürünler dikkate alınarak bir tersine lojistik ağ tasarımı yapılmıştır. Ahluwalia ve Nema [12]'de, kullanılmış ve ömrünü doldurmuş olan bilgisayarların oluşturduğu atıklar için bir atık yönetim sistemi planlaması ve tasarımı yapılmıştır. Sistemin toplam maliyetlerini enküçüklemek ve çevresel riskleri enküçüklemek amaçlarını sağlamak üzere doğrusal bir tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Sheu [13]'de, tehlikeli atıklar dikkate alınarak bir tersine lojistik ağ yapısı için, birbiriyle çelişen iki amaç, operasyonel maliyetlerin enküçüklenmesi ve risklerin enküçüklenmesi, için çok amaçlı bir doğrusal model geliştirilmiştir. Salema vd. [14]'de, bir ağ tasarım modeli incelenmiştir ve literatürdeki eksiklikler olarak değerlendirilen çok ürünlülük, limitli kapasiteler ve talep ile geri dönüşlerdeki belirsizlikler ortaya konulan karma tamsayılı doğrusal programlama model ile ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Lu ve Bostel [15]'de, hem ileri yönlü ve hem de tersine lojistiğin beraberce ele alındığı iki aşamalı bir karma tamsayılı model sunulmuştur. Demirel ve Gökçen [16]'da, tersine lojistik ağ tasarımı problemi, bir karma tamsayılı doğrusal model geliştirilerek incelenmiştir. Biehl vd. [17]'de, tersine lojistik ağ tasarımı konusu, sistemdeki belirsizliklere özellikle dikkat çekilerek bir simülasyon modeli yardımıyla incelenmiştir. Kara vd. [18]'de, Sidney metropolünde faydalı ömrünü doldurmuş ürünlerin toplanmasıyla ilgili bir tersine lojistik ağı, bir simülasyon modeli yardımıyla incelenmiştir. Srivastava [19]'da, tersine lojistikte ağ tasarımı problemi önce kavramsal olarak modellenerek böylesi bir sistem için gereklilikler belirlenmiş, sonrasında ise karma tamsayılı bir matematiksel modelleme yapılmıştır. Figueiredo ve Mayerle [20]'de, tersine lojistikte ağ tasarımı problemi incelenmiştir ve bir analitik model sunulmuştur. Pishvae vd. [21]'de, ileri yönlü ve tersine lojistiğin beraberce ele alındığı bir problem için bir karma tamsayılı matematiksel model önerilmiştir. Wadhwa vd. [22]'de, müşterilerden geri gelen ürünlerin en doğru şekilde değerlendirilmesi amacıyla, bulanık küme teorisi kullanılarak bir yaklaşım geliştirilmiştir. Easwaran ve Üster [23]'de, çok ürünlü, ileri ve tersine lojistiğin beraberce ele alındığı bir problem için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Sasikumar vd. [24]'de, kamyon tekerleklerinin yeniden üretimi için çok dönemli bir matematiksel model önerilmiştir. Alaykiran [25]'de, çok ürünlü bir tersine lojistik ağı geri

dönüşüm, yeniden üretim ve zararlı atıkların işlenmesi seçeneklerinin beraberce ele alındığı bir ağ tasarım problemi incelenmiştir, problemin çözümü için karma tamsayılı bir matematiksel model sunulmuştur. Büyük boyutlu problemler için ise tavlama benzetimi temelli bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Literatürde, tersine lojistikte ağ tasarımı konusunda yapılan diğer çalışmalar için Demirel ve Gökçen [26] ve Rubio vd. [3] incelenebilir.

Bu çalışmada, çok ürünlü bir tersine lojistik ağı, geri dönüşüm işlemi açısından incelenmiştir. Çalışmanın literatüre en büyük katkısı, müşterilerden toplanan ürünler için birden fazla ayrıştırma yöntemi tanımlanabilmesi ve birden fazla malzeme tipinin dikkate alınmasıdır. Müşteriden alınan bir ürün, ne kadar detaylı parçalanırsa, elde edilen geri dönüştürülebilir malzeme çıktısı, malzeme tipi ve miktarı da o kadar fazla olacaktır ancak bu işlem için kullanılan kapasite de fazla olacaktır. Bu özelliğin uygulamada bir geri dönüşüm ağı kurma amacındaki karar vericilere esneklik sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışmada ele alınan problemin çözümü için bir karma tamsayılı matematiksel model önerilmiştir. Matematiksel modelin çözüm performansının analizi amacıyla, problemin parametreleri olan müşteri sayısı, ürün sayısı, aday toplama tesisi sayısı ve ayrıştırma yöntemi sayısına göre bir deney planı oluşturularak, 240 adet problem üretilmiştir ve bu problemler genel amaçlı bir çözücü yardımıyla bir saatlik çözüm süresi içinde çözülmeye çalışılmıştır. Uygulamada, karar vericilerin karşılaşılabilecekleri küçük ve büyük boyutlu problemler dikkate alınarak gerçekleştirilen bu deneysel çalışmanın sonuçları, problemlerin çözüm süreleri dikkate alınarak analiz edilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde ele alınan problem detaylı olarak tanıtılmıştır, üçüncü bölümde problemin çözümü amacıyla geliştirilen karma tamsayılı modelin notasyonları ve model gösterimi verilmiştir, dördüncü bölümde deneysel çalışma ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak incelenmiştir, çalışma sonuç bölümüyle sonlandırılmıştır.

3. PROBLEMİN TANIMLANMASI (PROBLEM DEFINITION)

Bu çalışmada, çok ürünlü ve çok sayıda geri dönüşebilir malzeme tipinin dikkate alındığı bir tersine lojistik ağ tasarımı problemi ele alınmıştır. Problemin bileşenleri, müşteriler, ürünler, toplama tesisleri ve geri dönüşüm tesisleridir. Müşterilerin konumları ve geri vermek üzere ellerinde bulunan ürün miktarları bilinmektedir. Toplama tesisleri için aday noktalar belirlenmiştir ve sistemin ihtiyacını karşılamak üzere bu noktalarda tesis açma kararı alınacaktır. Toplama tesislerinde ürünler birden fazla ayrıştırma yöntemine göre parçalanmakta ve belirlenen geri dönüştürülebilir malzeme tiplerine ayrıştırılmaktadır. Her bir ayrıştırma yöntemi için farklı miktarlarda ve tiplerde geri dönüştürülebilir malzeme miktarı elde edilirken, her bir ayrıştırma

yöntemi için kullanılan kapasite de farklılık göstermektedir. Geri dönüştürülebilir malzeme tipleri, o tipte malzemeyi işleyebilen geri dönüşüm tesislerine gönderilmektedir. Kurulacak olan ağın temel politikası, müşterilerden tüm ürünleri geri almak ve kapasite sınırlamaları ve maliyetler dikkate alınarak toplanan bu ürünlerin gerektiği kadarını parçalanmak ve geri dönüştürmektir. Ancak, çeşitli yasal düzenlemeler gereği bazı ürünler için üreticilerin o ürünün belli bir yüzdesini ayrıştırmak ve geri dönüştürmek zorunluluğu vardır. Ele alınan ağ tasarımı probleminde bu özellik de dikkate alınmıştır. Amaç, kapasite kısıtlamaları dikkate alınarak kurulacak olan tersine lojistik ağının toplam maliyetinin en küçüklenmesidir. Sistemin maliyetleri, toplama tesislerinin açılma maliyetleri ile müşterilerden toplama tesislerine ve toplama tesislerinden geri dönüşüm tesislerine ulaştırma maliyetleridir. Sistemin kazancı ise geri dönüştürülebilir malzemelerin geri dönüşüm tesislerine satılmasıyla elde edilen gelirdir. Ele alınan sistemde, hem gelirler ve hem de maliyetler dikkate alındığından, amaç, sistemin toplam karının en büyüklenmesi olarak da yorumlanabilir.

4. ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL (PROPOSED MATHEMATICAL MODEL)

Bu çalışmada ele alınan problemin çözümü amacıyla bir karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Bu bölümde, matematiksel modelde kullanılan notasyonlar açıklandıktan sonra geliştirilen matematiksel model verilmektedir.

- s : Ürünler;
- d : Ayrıştırma yöntemleri;
- t : Müşteriler;
- l : Aday toplama tesisi konumları;
- r : Geri dönüşüm tesisleri;
- m : Geri dönüştürülebilir malzeme tipleri;
- j : Toplama tesisi tipleri;

Parametreler:

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

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

$\gamma^2_{s,d}$: d ayrıştırma yöntemine göre parçalanmış s ürünündeki katı atık ağırlığı;

Q_s : s ürünün ağırlığı;

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

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

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

- C_j^l : j tipindeki toplama tesisinin kapasitesi;
 $P_{l,s,d}$: d ayrıştırma yöntemine göre s ürününü l toplama tesisinde işlemenin maliyeti ;
 $\delta_{l,s,d}$: d ayrıştırma yöntemine göre s ürününün l toplama tesisinde işlenirken kullanılan kapasite;
 $N_{r,m} = \begin{cases} 1 & \text{Eğer } m \text{ malzeme tipi } r \text{ geri dönüşüm tesisinde işlenebilirse} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$;
 C_r^u : r geri dönüşüm tesisine toplam nakledilebilecek geri dönüştürülebilir malzeme miktarı;
 σ_m^u : Birim ağırlıkta m malzemesinin geri dönüşüm tesisine satılmasından sağlanan gelir;
 F : Birim ağırlığı birim mesafeye taşıma maliyeti;
 D : Birim ağırlık için katı atık maliyeti;
 $L_{t,l}^{KC}$: t müşterisi ile l toplama tesisi arasındaki mesafe;
 $L_{l,r}^{CU}$: l toplama tesisi ile r geri dönüşüm tesisi arasındaki mesafe;
 M : Büyük bir sayı

Karar değişkenleri:

- $Y_{l,j}^C = \begin{cases} 1 & \text{Eğer } l \text{ aday noktasında } j \text{ tipinde bir toplama tesisi açılmışsa} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$;
 $X_{t,l,s}^{KC}$: t müşterisinden l toplama tesisine olan s ürünü akışı;
 $X_{l,r,m}^{CU}$: l toplama tesisinden r geri dönüşüm tesisine olan m malzeme akışı;
 $Z_{l,s,d}$: l 'de toplanmış, ayrıştırılmış ve d ayrıştırma yöntemine göre parçalanmış s ürünü sayısı;
 $A_{l,s}$: Kapasite kısıtlamaları nedeni ile l toplama tesisinde tümüyle atılan s ürünü sayısı;

Model parametreleri ve karar değişkenleri gösterilirken, fazladan sembol kullanmamak amacıyla, benzer anlamda kullanılan notasyonlarda üst simgeler kullanılmıştır. Örneğin, $X_{t,l,s}^{KC}$ karar değişkeni, t müşterisinden l toplama tesisine olan s ürünü akışını gösterirken, $X_{l,r,m}^{CU}$, l toplama tesisinden r geri dönüşüm tesisine olan m malzeme akışını göstermektedir.

Matematiksel Model:

$$\text{Max } \sum_m \sigma_m^u * \sum_l \sum_r X_{l,r,m}^{CU} - \sum_l \sum_j Y_{l,j}^C * O_{l,j} - D * \left(\sum_l \sum_s A_{l,s} * Q_s \right) + D * \sum_s \sum_d \gamma_{s,d}^2 * \sum_l Z_{l,s,d} -$$

$$\sum_l \sum_s \sum_d Z_{l,s,d} * P_{l,s,d} - F * \sum_t \sum_l \sum_s Q_s * L_{t,l}^{KC} * X_{t,l,s}^{KC} \quad (1)$$

$$- F * \sum_l \sum_r \sum_m L_{l,r}^{CU} * X_{l,r,m}^{CU}$$

s.t.

$$\sum_j Y_{l,j}^C \leq 1 \quad \forall l \quad (2)$$

$$\sum_l \sum_d Z_{l,s,d} \geq B_s * \sum_t R_{t,s} \quad \forall s \quad (3)$$

$$\sum_l X_{t,l,s}^{KC} = R_{t,s} \quad \forall t,s \quad (4)$$

$$\sum_t \sum_s X_{t,l,s}^{KC} \leq \sum_j Y_{l,j}^C * M \quad \forall l \quad (5)$$

$$\sum_t X_{t,l,s}^{KC} = A_{l,s} + \sum_d Z_{l,s,d} \quad \forall l,s \quad (6)$$

$$\sum_l Z_{l,s,d} \leq K_{s,d} * M \quad \forall s,d \quad (7)$$

$$\sum_l X_{l,r,m}^{CU} \leq N_{r,m} * M \quad \forall r,m \quad (8)$$

$$\sum_r X_{l,r,m}^{CU} = \sum_s \sum_d \gamma_{s,d,m} * Z_{l,s,d} \quad \forall l,m \quad (9)$$

$$\sum_s \sum_d Z_{l,s,d} * \delta_{l,s,d} \leq \sum_j Y_{l,j}^C * C_j^l \quad \forall l \quad (10)$$

$$\sum_l \sum_m X_{l,r,m}^{CU} \leq C_r^u \quad \forall r \quad (11)$$

$$X_{l,r,m}^{CU} \geq 0 \quad (12)$$

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

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

Matematiksel modelin amaç fonksiyonu, sistem maliyetleri ve elde edilen gelirlerden oluşmaktadır ve sistemin toplam karının enbüyüklenmesidir.

$\sum_l \sum_j Y_{l,j}^C * O_{l,j}$, toplama tesislerinin açılmasından

kaynaklanan sabit maliyetleri;

$$D * \left(\sum_l \sum_s A_{l,s} * Q_s \right) + D * \sum_s \sum_d \gamma_{s,d}^2 * \sum_l Z_{l,s,d}$$

sırasıyla toplama tesislerinde işlenemediği için atılan parçalar ile ayrıştırma sonrası kullanılmayacak bölümlerin katı atık maliyetlerini;

$\sum_l \sum_s \sum_d Z_{l,s,d} * P_{l,s,d}$ ayrıştırma maliyetlerini;

$F * \sum_t \sum_l \sum_s Q_s * L_{t,l}^{KC} * X_{t,l,s}^{KC}$ müşterilerden toplama tesislerine ulaştırma maliyetlerini, $F * \sum_l \sum_r \sum_m L_{l,r}^{CU} * X_{l,r,m}^{CU}$ toplama tesislerinden geri dönüşüm tesislerine ulaştırma maliyetlerini göstermektedir. Sistemin tek gelir kalemi olan geri dönüştürülmek üzere verilen malzemelerden elde edilen gelir $\sum_m \sigma_m^u * \sum_l \sum_r X_{l,r,m}^{CU}$ ile gösterilmiştir.

(2) numaralı kısıt ile bir aday noktada yalnızca tek bir tipte toplama tesisi açılması sağlanmıştır. (3) numaralı kısıt ile her bir ürün tipi için en az belirlenen alt sınır kadarının toplama tesislerinde işlenmesi sağlanmıştır. (4) numaralı kısıt ile müşterilerin ellerindeki tüm ürünlerin toplanması sağlanmıştır. (5) numaralı kısıt ile müşterilerden ürünlerin yalnızca o toplama tesisi açılmışsa ulaştırılması garanti altına alınmıştır. (6) numaralı kısıt ile müşterilerden alınan ve bir toplama tesisine teslim edilen ürünlerin ya tümüyle atılacağı ya da bir ayrıştırma yöntemine göre parçalanacağı belirtilmiştir. (7) numaralı kısıt ile bir toplama tesisinde bir ürünün yalnızca o ürün için belirlenen ayrıştırma yöntemlerinden birine göre parçalanabileceği belirlenmiştir. (8) numaralı kısıt ile bir geri dönüşüm tesisine yalnızca orada geri dönüştürülebilecek malzeme tiplerinin gönderilebileceği doğrulanmaktadır. (9) numaralı kısıt ile bir toplama tesisinden bir geri dönüşüm tesisine gönderilecek her bir malzeme tipinin o toplama tesisinde parçalanmış ürünlerden elde edilen malzemeler olması sağlanmıştır. (10) ve (11) numaralı kısıtlarla sırasıyla toplama tesisleri ve geri dönüşüm tesisleri için kapasite kısıtlarıdır. (12) numaralı kısıt ile, karar değişkenlerinin matematiksel tipleri tanımlanmıştır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada ele alınan problemin literatüre en büyük katkısı, her ürün için birden fazla ayrıştırma yönteminin tanımlanabilmesi ve birden fazla malzeme tipinin dikkate alınmasıdır. Bu hususlar, karar vericiye esneklik sağlamaktadır. Çünkü uygulamada, müşterilerden geri dönen ürünler birbirinden farklılık gösterdiği için her bir ürün tipi farklı ayrıştırma yöntemleri gerektirebilir.

Bu çalışmada dikkate alınan geri dönüşüm ağı tasarımı problemi için geliştirilen matematiksel modelin etkinliğini göstermek amacıyla küçük ve büyük boyutlu deneysel problemler üretilmiştir. Bu problemler bir matematiksel model çözücü olan Gams 23.3 ile çözülmüştür. Problemler, müşteri sayısı, aday toplama tesisi sayısı, ürün sayısı ve ayrıştırma yöntemi sayısına göre farklılık gösterecek şekilde üretilmiştir. Her bir deney planı için beş ayrı problem örneği üretilerek rassallıktan doğabilecek sonuçlar

önlenmeye çalışılmıştır. Dolayısıyla toplamda, küçük ve büyük boyutlu 120'şer örnek üretilmiştir. Problemlerin üretiminde kullanılan deney planı Tablo 1'de gösterilmiştir. Problemler, çözüm süreleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Her bir problemin çözümü için 3600 saniye çözüm süresi verilmiştir ve bu süre içinde çözülemeyen problemlerin belirlenen alt sınır değerinden yüzde farkı hesaplanmıştır.

Tablo 1. Deneysel Planı (Experimental Design)

	Müşteri Sayısı	Ürün Sayısı	Aday Toplama Tesisi Sayısı	Ayrıştırma Yöntemi Sayısı
Küçük Boyutlu Örnekler	100, 200 ve 400	2 ve 5	40 ve 80	1 ve 2
Büyük Boyutlu Örnekler	600, 800 ve 1000	2 ve 5	150 ve 300	1 ve 2

Deneysel problemlerin oluşturulmasında aşağıda adımlarıyla belirlenen yöntem uygulanmıştır:

Adım 1: Tüm problemlerde yirmi adet geri dönüşüm tesisi olduğu kabul edilmiştir ve bunlara ait kartezyen konumlar ve kullanılabilir kapasiteler belirlenmiştir.

Adım 2: Tüm problemlerde üç adet geri dönüştürülebilir malzeme tipi olduğu ve aday toplama tesislerinin beş farklı kapasite tipinde açılabilmesi kabul edilmiştir. Herbir problemin ürün sayısı ve ayrıştırma yöntemi sayısı kadar geri dönüşüm çıktısı belirlenmiştir. Herbir geri dönüştürülebilir malzeme tipinin birim ağırlığının satılmasından elde edilen gelir belirlenmiştir.

Adım 3: Tüm müşterilerin kartezyen konumları ve her bir ürün tipinden geri verilmek üzere hazır olan ürün sayısı Uniform dağılıma uygun olarak ve [0,50] aralığında belirlenmiştir.

Adım 4: Tüm aday toplama tesislerinin kartezyen konumları belirlenmiştir ve bu tesislerin kapasiteleri, Adım 3'de belirlenen ürün sayıları dikkate alınarak, sistemin ihtiyacını karşılayabilecek şekilde belirlenmiştir. Ayrıca her bir aday toplama tesisinin açılma maliyetleri belirlenmiştir.

Adım 5: Sistemin bileşenleri arasındaki Öklid uzaklıklar belirlenmiştir ve sistemin diğer parametreleri belirlenmiştir.

Belirtilen bu sistematik yaklaşım ile üretilen toplam 240 problem, 2 Ghz işlemci hızında ve 2 GB RAM kullanan bir bilgisayarda GAMS 23.3 programı kullanılarak ve her bir probleme 3600 saniye (1 saat) çözüm süresi verilerek çözülmüştür. Sürekli ve kesikli

değişkenlerin birlikte ele alındığı matematiksel modellerin çözümünde, belirlenen alt sınır değerini sağlayana kadar çözümü sürdürmek bazı durumlarda çözüm süresini uzatmaktadır. Çünkü bu tür durumlarda yazılım, altsınır değerine on binde bir yakın bir sonuç bulduğunda dahi çözümü eniyi çözümün elde edilmesine kadar sürdürmektedir. GAMS 23.3 yazılımının *optcr* adı verilen ve eniyi çözümden belli bir uzaklıktaki çözüme ulaşıldığında çözümün tamamlanmasını sağlayan parametresi için yüzde 0,01 değeri belirlenmiştir. Diğer bir anlatımla, eniyi çözümden onbinde birlik bir sapma ile bulunan çözümler, eniyi çözüm olarak kabul edilmiştir. Bir saatlik çözüm süresi içinde eniyi çözümü bulunamayan problemlerin o ana kadar bulunan eniyi çözümün o problem için belirlenen alt sınıra olan yüzdesel farkı hesaplanmış ve “Yüzde Hata” olarak raporlanmıştır.

Üretilen tüm problemlerin 137 tanesi 3600 saniye içinde çözülememiştir. Bunlardan yalnızca 18 tanesi küçük boyutlu, kalan 119 tanesi ise büyük boyutludur. Küçük boyutlu olan problemler için ortalama yüzde hata 0,03 iken büyük boyutlu örnekler için ortalama yüzde hata 2,27 olarak gerçekleşmiştir. 3600 saniyeden daha kısa zamanda eniyi çözümü bulunan 103 problem için ise ortalama çözüm süresi 377,71 saniyedir. Bunlardan 102 tanesi küçük boyutlu problemlerdir ve bunların çözüm süresi ortalaması 373,20 saniyedir. 3600 saniyeden daha kısa zamanda eniyi çözümü bulunan tek büyük boyutlu problem ise 837,41 saniyede çözülmüştür. Tablo 2’de deneysel problemlerden 3600 saniye içinde eniyi çözümü bulunamayanlara ilişkin ortalama yüzde hata, enküçük ve enbüyük yüzde hatalar verilmiştir. Burada, 18 adet küçük boyutlu problem, ortalama % 0,03 hata ile, 119 büyük boyutlu problem ise % 2,27 yüzde hata ile çözülmüştür. Küçük boyutlu problemlerde karşılaşılan en büyük yüzde hata % 0,07 iken büyük boyutlu problemlerde bu oran % 37,5 olarak gerçekleşmiştir. Tablo 3’de ise 3600 saniyenin altında çözülebilen problemlere ilişkin ortalama çözüm süresi, enküçük ve enbüyük çözüm süreleri sunulmuştur. Büyük boyutlu problemlerden yalnızca bir tanesi için eniyi çözüm bulunmuştur. Bu nedenle, 3600 saniyenin altında optimal sonucu bulunan problemlere ilişkin ilgili tablolarda büyük boyutlu problemler dikkate alınmamıştır.

Tablo 2. 3600 saniye içinde çözülemeyen problemler için yüzde hata değerleri (Difference in percentages for problems those are not solved to optimality in 3600 seconds)

Boyut	Problem Sayısı	Ortalama Yüzde Hata	En Küçük Yüzde Hata	En Büyük Yüzde Hata
Küçük	18	0,03	0,01	0,07
Büyük	119	2,27	0,01	37,5

Tablo 3. Eniyi çözümü bulunan küçük boyutlu problemler için çözüm süreleri (CPU times for the small size problems solved to optimality)

Problem Sayısı	Ortalama Çözüm Süresi	En Küçük Çözüm Süresi	En Büyük Çözüm Süresi
103	377,71	5,32	3531,08

Bu çalışmada dikkate alınan ağ tasarım probleminin çözümü amacıyla geliştirilen matematiksel modelin etkinliğini göstermek üzere üretilen deneysel problemler; müşteri sayıları, aday toplama tesisi sayıları, ürün sayıları ve ayırıştırma yöntemi sayılarına göre ayrılmaktadır. Müşteri sayılarına göre 100, 200 ve 400 müşterili örnekler küçük boyutlu; 600, 800 ve 1000 müşterili örnekler ise büyük boyutlu olarak kabul edilmiştir. Müşteri sayılarına göre, 3600 saniye içinde eniyi çözümü bulunamayan problemlere ilişkin ortalama yüzde hata, en küçük ve en büyük yüzde hata değerleri Tablo 4’de verilmiştir. Müşteri Sayılarına göre, 3600 saniyenin altında eniyi çözümü bulunan problemlere ilişkin ortalama, enküçük ve enbüyük çözüm süreleri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 4 incelendiğinde, küçük boyutlu problemlerden, 3600 saniyelik çözüm süresi içinde eniyi çözümü bulunamayan örneklerden 7 tanesinin 100 müşterili, 6 tanesinin 200 müşterili ve 5 tanesinin de 400 müşterili olduğu görülmüştür. Büyük boyutlu problemlerde ise, 600 müşterili 39 problemin, 800 ve 1000 müşterili tüm problemlerin belirlenen 3600 saniye içinde çözülemediği görülmüştür. Ancak, küçük boyutlu problemlerden tüm müşteri sayıları için, ortalama yüzde hata en fazla 0,038 olarak gerçekleşmiştir. Büyük boyutlu problemlerde ise ortalama yüzde hata en fazla 1000 müşterili örneklerde de 3,130 olarak bulunmuştur. Tablo 5’de görüldüğü gibi, müşteri sayıları dikkate alındığında eniyi çözümü bulunan örneklerin ortalama çözüm süresi, 100 müşterili problemlerde 180,11 saniye iken, 200 müşterili problemlerde 318,10 saniye ve 400 müşterili örneklerde de 608,77 saniye olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 4. Müşteri sayılarına göre eniyi çözümü bulunamayan problemler için yüzde hata değerleri (Difference in percentages for problems which are not solved to with respect to the number of customers)

Boyut	Müşteri Sayısı	Problem Sayısı	Ortalama Yüzde Hata	En Küçük Yüzde Hata	En Büyük Yüzde Hata
Küçük	100	7	0,035	0,011	0,062
	200	6	0,027	0,010	0,073
	400	5	0,038	0,018	0,076
Büyük	600	39	0,346	0,029	1,636
	800	40	3,248	0,012	37,51
	1000	40	3,130	0,016	17,94

Tablo 5. Müşteri sayılarına göre eniyi çözümü bulunan küçük boyutlu problemler için çözüm süreleri (CPU times for small sized problems which are solved to optimality with respect to the number of customers)

Problem Sayısı	Müşteri Sayısı		
	100	200	400
Ortalama Çözüm Süresi	180,11	318,10	608,77
En Küçük Çözüm Süresi	5,32	18,58	33,18
En Büyük Çözüm Süresi	1607,13	1727,91	3531,08

Deneyel problemlerde dikkate alınan bir diğer parametre de ürün sayılarıdır. 3600 saniyelik çözüm süresi içinde eniyi çözümü bulunamayan problemlerin ürün sayılarına göre dağılımları Tablo 6'da verilmiştir. Ürün sayılarına göre, eniyi çözümü bulunabilen problemlere ilişkin çözüm süreleri ortalamaları ve enküçük ve enbüyük çözüm süreleri ise Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6. Ürün sayılarına göre eniyi çözümü bulunamayan problemler için yüzde hata değerleri (Difference in percentages for problems which are not solved to optimality with respect to the number of products)

Boyut	Ürün Sayısı	Problem Sayısı	Ortalama Yüzde Hata	En Küçük Yüzde Hata	En Büyük Yüzde Hata
Küçük	2	0	-	-	-
	5	18	0,033	0,010	0,076
Büyük	2	59	0,167	0,016	1,615
	5	60	4,31	0,012	37,51

Tablo 7. Ürün sayılarına göre eniyi çözümü bulunan küçük boyutlu problemler için çözüm süreleri (CPU times for small size problems which are solved to optimality with respect to the number of products)

Ürün Sayısı	Problem Sayısı	Ortalama Çözüm Süresi	En Küçük Çözüm Süresi	En Büyük Çözüm Süresi
2	60	259,07	5,32	3531,08
5	42	550,00	49,61	3053,35

Tablo 6 ve Tablo 7'de verilen bilgiler ışığında, ürün sayısındaki artışın, ortalama çözüm sürelerini ve bir saatlik çözüm süresi içinde eniyi çözümü bulunamayan problem sayısını artırdığı görülmektedir. Ürün sayılarındaki artış, ortalama yüzde hatayı da artırmaktadır. Aday toplama merkezi sayısına göre, 3600 saniye içinde eniyi çözümü bulunamayan problemlerin sayısı, ortalama, enküçük ve enbüyük yüzde hata değerleri Tablo 8'de; eniyi çözümü bulunan problemlere ilişkin çözüm süreleri

ortalamaları ve enküçük ve enbüyük çözüm süreleri ise Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 8. Aday toplama tesisi sayılarına göre eniyi çözümü bulunamayan problemler için yüzde hata değerleri (Difference in percentages for problems which are not solved to optimality with respect to the number of potential collection centers)

Aday Toplama Tesisi Sayısı	Problem Boyutu			
	Küçük		Büyük	
Problem Sayısı	4	14	59	60
Ortalama Yüzde Hata	0,018	0,037	0,221	4,259
En Küçük Yüzde Hata	0,012	0,010	0,012	0,027
En Büyük Yüzde Hata	0,028	0,076	1,467	37,51

Tablo 9. Aday toplama tesisi sayılarına göre eniyi çözümü bulunan küçük boyutlu problemler için çözüm süreleri (CPU times for small size problems which are solved to optimality with respect to the number of potential collection centers)

Aday Toplama Tesisi Sayısı	Problem Sayısı	Ortalama Çözüm Süresi	En Küçük Çözüm Süresi	En Büyük Çözüm Süresi
40	56	145,98	5,32	790,89
80	46	649,81	32,28	3531,08

Tablo 8 ve Tablo 9'da verilen bilgilere göre, aday toplama tesisi sayısındaki artış bir saatlik çözüm süresinde eniyi çözümü bulunabilen problem sayısında azalmaya, bu süre içinde eniyi çözümü bulunabilen problemler için ise ortalama çözüm süresinde artışa neden olmuştur.

Deneyel çalışmada dikkate alınan son parametre ise ürünlerin ayrıştırma yöntemi sayılarıdır. Literatürdeki pek çok çalışmada ürünler yalnızca tek bir ayrıştırma yöntemine göre parçalanmakta ve elde edilen geri dönüştürülebilir malzeme çıktısı aynı olmaktadır. Bu çalışmada ise, ürünler önceden planlanan birden fazla ayrıştırma yöntemine göre parçalanabilmekte ve elde edilen çıktı farklı olmaktadır. Burada, bir ürünün hangi ayrıştırma yöntemine göre parçalanacağı kararı, toplama tesislerinin kapasitesi ile birim geri dönüştürülebilir malzemenin satışından elde edilen gelir arasında dengeli bir karardır. Tablo 10 ve Tablo 11'de ayrıştırma yöntemi sayılarına göre çözülen problemler için bulunan çözüm süreleri gösterilmiştir.

Tablo 10 ve Tablo 11'de verilen bilgilere göre, ayrıştırma yöntemi sayısındaki artışın problemlerin çözüm süreleri üzerinde diğer parametreler kadar etkili olmadığı görülmüştür.

Tablo 10. Ayırıştırma yöntemi sayılarına göre eniyi çözümü bulunamayan problemler için yüzde hata değerleri (Difference in percentages for problems which are not solved to optimality with respect to the number of disassembly methods)

Boyut	Ayırıştırma Yöntemi Sayısı	Problem Sayısı	Ortalama Yüzde Hata	En Küçük Yüzde Hata	En Büyük Yüzde Hata
Küçük	1	6	0,055	0,020	0,076
	2	12	0,022	0,010	0,047
Büyük	1	60	1,377	0,020	15,899
	2	59	3,152	0,012	37,51

Tablo 11. Ayırıştırma yöntemi sayılarına göre eniyi çözümü bulunan problemler için çözüm süreleri (CPU times for problems which are solved to optimality with respect to the number of disassembly methods)

Ayırıştırma Yöntemi Sayısı	Problem Sayısı	Ortalama Çözüm Süresi	En Küçük Çözüm Süresi	En Büyük Çözüm Süresi
1	54	352	8,60	3063,35
2	48	397,05	5,32	3531,08

6. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND FUTURE REMARKS)

Bu çalışmada, çok ürünlü bir tersine lojistik ağ tasarımı problemi geri dönüşüm seçeneği dikkate alınarak incelenmiştir. Çok sayıda geri dönüştürülebilir malzeme tipinin dikkate alındığı ve ürünler için birden fazla ayırıştırma yönteminin tanımlanabildiği problem yapısı, karar vericilere esneklik sağlamaktadır. Tanımlanan problemin çözümü amacıyla karma tamsayı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Uygulamada etkin bir tersine lojistik ağı kurmak isteyen karar vericilerin karşılaşılabileceği farklı parametre seviyelerini - müşteri sayısı, ürün sayısı, ayırıştırma yöntemi sayısı, aday toplama merkezi sayısı - dikkate alarak küçük ve büyük boyutlu toplam 240 problem üretilmiştir. Üretilen bu problemler, bir matematiksel model çözücü olan GAMS 23.3 ile bir saatlik (3600 saniye) çözüm süresi içinde çözülmeye çalışılmıştır. Üretilen problemlerden 103 tanesinde belirlenen bu süre içinde eniyi çözüm elde edilmiştir. Eniyi çözümü bulunamayan 137 problem için bir saatlik çözüm süresinde ulaşılan eniyi amaç fonksiyonu değerinin, herbir problem için çözücü yazılım tarafında belirlenen alt sınır değeri ile olan yüzdesel farkı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, eniyi çözümü bulunabilen ve bulunamayan problemler ve deneysel çalışmada dikkate alınan herbir parametre için analiz edilmiştir. Matematiksel modelin küçük boyutlu problemlerde eniyi çözüme ulaşabildiği ancak müşteri sayısının 600'ü aştığı, aday toplama tesisi sayısının 150'den fazla olduğu ve ürün sayısının 5 ve daha fazla olduğu durumlarda çözüm süresinin arttığı görülmüştür.

Uygulamada etkin bir tersine lojistik ağı kurmak isteyen karar vericilerin karşılaşılabileceği çok ürünlülük, farklı malzeme tipleri ve ürünler için farklı ayırıştırma yöntemleri gibi faktörlerin dikkate alındığı bu çalışmanın, gelecekte ürün geri dönüşleri ve miktarlarındaki belirsizliklerin de dikkate alınmasıyla geliştirilebileceği öngörülmektedir. Aynı zamanda, uygulamada karşılaşılabilecek daha büyük boyutlu problemlerin makul sürelerde çözülebilmesi için metasezgisellere dayalı sezgisel algoritmalar geliştirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., Van der Laan, E.A., Van Nunen, J.A.E.E. ve Van Wassenhove, L.N., "Quantitative models for reverse logistics: a review", *European Journal of Operational Research*, Cilt 103, 1-13, 1997.
- [2] Thierry, M., Salomon, M., Nunen, J. ve Wassenhove, L., "Strategic Issues in Product Recovery Management", *California Management Review*, Cilt 37, No 2, 114-135, 1995.
- [3] Rubio, S., Chamorro, A. ve Miranda, F. J., "Characteristics of the research on reverse logistics (1995-2005)", *International Journal of Production Research*, Cilt 46, No 4, 1099 - 1120, 2008.
- [4] Louwers, D., Kip, B.J., Peters, E., Souren, F. ve Flapper, S.D.P., "A facility location allocation model for re-using carpet materials", *Computers and Industrial Engineering*, Cilt 36, 1-15, 1999.
- [5] Jayaraman, V., Guide Jr, V.D.R. ve Srivastava, R., "A closed-loop logistics model for remanufacturing", *Journal of Operational Research Society*, Cilt 50, 497-508, 1999.
- [6] Shih, L., "Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan", *Resources, Conservation and Recycling*, Cilt 32, 55-72, 2001.
- [7] Sodhi, M.S. ve Reimer, B., "Models for recycling electronics end-of-life products" *OR Spectrum*, Cilt 23, 97-115, 2001.
- [8] Okumura, S., Morikuni, T. ve Okino, N., "Environmental effects of physical life span of a reusable unit following functional and physical failures in a remanufacturing system" *International Journal of Production Research*, Cilt 41, 3667-3687, 2003.
- [9] Beamon, B.M. ve Fernandes, C., "Supply-chain network configuration for product recovery", *Production Planning and Control*, Cilt 13, 270-281, 2004.

- [10] Sheu, J.B., Chou, Y.H. ve Hu, C.C., "An integrated logistics operational model for green-supply chain management", *Transportation Research Part E*, Cilt 41, 287–313, 2005.
- [11] Min, H., Ko, H. J. ve Ko, C. S., "A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns", *Omega*, Cilt 34, 56-69, 2006.
- [12] Ahluwalia, P. K. ve Nema, A. K., "Multi-objective reverse logistics model for integrated computer waste management", *Waste Management and Research*, Cilt 24, 514-527, 2006.
- [13] Sheu, J. B., "A coordinated reverse logistics system for regional management of multi-source hazardous wastes", *Computers and Operations Research*, Cilt 34, 1442-1462, 2007.
- [14] Salema, M. I. G., Barbosa-Pavoa, A. P. ve Novais, A. Q., "An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty", *European Journal of Operational Research*, Cilt 179, 1063-1077, 2007.
- [15] Lu, Z. ve Bostel, N., "A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities", *Computers and Operations Research*, Cilt 34, 299-323, 2007.
- [16] Demirel, N. O. ve Gökçen, H., "A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt 39, 1197-1206, 2007.
- [17] Biehl, M., Prater, E. ve Realff, M. J., "Assessing performance and uncertainty in developing carpet reverse logistics systems", *Computers and Operations Research*, Cilt 34, 443-463, 2007.
- [18] Kara, S., Rugrungruang, F. ve Kaebnick, H., "Simulation modelling of reverse logistics Networks", *International Journal of Production Economics*, Cilt 106, 61-69, 2007.
- [19] Srivastava, S. K., "Network design for reverse logistics", *Omega*, Cilt 36, 535-548, 2008.
- [20] Figueiredo, J. N. ve Mayerle, S. F., "Designing minimum-cost recycling collection networks with required throughput", *Transportation Research Part E*, Cilt 44, 731-752, 2008.
- [21] Pishvaei, M. S., Jolai, F. ve Razmi, J., "A stochastic model for integrated forward/reverse logistics network design", *Journal of Manufacturing Systems*, Cilt 28, 107-114, 2009.
- [22] Wadhwa, S., Madaan, J. ve Chan, F. T. S., "Flexible decision modelling of reverse logistics system: A value adding MCDM approach for alternative selection", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Cilt 25, 460-469, 2009.
- [23] Easwaran, G. ve Üster, H., "A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions", *IIE Transactions*, Cilt 42, 779-792, 2010.
- [24] Sasikumar, P., Kannan, G. ve Haq, A. N., "A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery – A case of truck tire remanufacturing", *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, Cilt 49, 1223-1234, 2010.
- [25] Alaykırın, K., "Çok Ürünlü Tersine Lojistik Ağ Tasarımı: Matematiksel Model ve Tavlama Benzetimi Temelli Çözüm Yaklaşımı", *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [26] Demirel, N. Ö. ve Gökçen, H., "Geri Kazanımlı İmalat Sistemleri İçin Lojistik Ağı Tasarımı: Literatür Araştırması", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Cilt 23, 903-912, 2008.

