

KAPALI DÖNGÜ TEDARİK ZİNCİRİ AĞI TASARIMI

Aycan KAYA^{1*}, Sibel ALUMUR ALEV²

¹ İTÜ İşletme Mühendisliği Bölümü, İstanbul
kayaayca@itu.edu.tr

² Waterloo Üniversitesi Yönetim Bilimleri Bölümü, Kanada
sibel.alumur@uwaterloo.ca

Geliş Tarihi: 19.10.2016; Kabul Ediliş Tarihi: 17.07.2017

ÖZ

Bu çalışmada, ileri yöndeki geleneksel tedarik zinciri faaliyetlerine ek olarak tersine akış ve tersine tedarik zinciri faaliyetlerini de içinde barındıran kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemi ele alınmaktadır. Stratejik ve taktik seviyedeki kararların birlikte verilmesini gerektiren bu tasarım problemi kapsamında çok ürünli, kapasiteli, karma bir tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Stratejik seviyede, üretim ve geri kazanım tesislerinin nerelere açılacağına ve hâlihazırda açık olan tesislerden hangilerinin kapatılacağına karar verilmektedir. Taktik seviyede ise üretim tesislerinde elde edilen yeni ürünlerle geri kazanım tesislerinde elde edilen yenilenmiş ürünlerin müşterilere doğru ileri yöndeki akış miktarları ile kullanılmış ürünlerin müşterilerden geri kazanım tesislerine doğru tersine yöndeki akış miktarlarına ve üretim ile geri kazanım tesislerinde işlenmesi gereken toplam ürün miktarlarına karar verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kapalı döngü tedarik zinciri, tersine lojistik, tesis yer seçimi

CLOSED LOOP SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN PROBLEM

ABSTRACT

In this study, we address the closed loop supply chain network design problem, which integrates reverse flows and reverse supply chain activities into the traditional forward supply chain activities. This network design problem requires strategic and tactical level decisions to be taken into account simultaneously. Within this context, a multiproduct and capacitated mixed integer linear programming model is developed. At the strategic level, the model decides where to open production and recovery facilities and which existing facilities to close. At the tactical level, the model decides on the amount of products that are obtained either from manufacturing or recovery to send to customers in the forward direction, the amount of used products to send from the customers to the recovery facilities in the reverse direction, and the total amount of products to be processed in production and recovery facilities.

Keywords: Closed loop supply chain, reverse logistics, facility location

* İletişim yazarı

1. GİRİŞ

Endüstri devrimi sonrasında başta küresel ısınma olmak üzere pek çok çevresel sorun, hava, su ve topraktaki kirlenme, ciddi boyutlara ulaşmıştır. Bu çevresel sorunların çözülebilmesi için Birleşmiş Milletler (BM) ve Avrupa Birliği (AB) içindeki birçok gelişmiş ülkede aksiyonlar alınmaya başlanmış ve çeşitli yasalar yürürlüğe konmuştur. Türkiye'nin 2009'da üye olduğu Kyoto Protokolü küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda mücadele etmek amacıyla BM'nin öncülüğünde 1997 yılında imzalanmıştır (Wikipedia, 2014). Avrupa Birliği'nde ise 1973 yılından bu yana çevre eylem programları uygulanmaktadır. Bu kapsamda, hava kalitesi, su kalitesi, atık yönetimi, doğa koruma, endüstriyel kirlenmenin kontrolü ve risk yönetimi, kimyasallar, iklim değişikliği ve çevresel gürültü konusunda çok çeşitli direktifler yürürlüğe girmiştir (AB Bakanlığı, 2014).

Bu çalışmada ele alınan konu ile doğrudan bağlantılı olarak Avrupa Parlamentosu ve Komisyonu tarafından 2000/53/EC sayılı "Ömrünü Tamamlamış Taşıtların Kontrolü" ve 2002/96/EC sayılı "Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya" Direktifleri yayımlanmıştır. Bu direktifler kapsamında, artık üreticiler ürettikleri araçlar ile elektrikli ve elektronik eşyaların geri toplanması ve çevreye zararsız hale getirilmesi konusunda yükümlü tutulmaktadır (Avrupa Parlamentosu, 2011; Avrupa Komisyonu, 2014).

Yasal zorunlulukların yanı sıra müşterilerin artan çevre bilinci de üreticileri çevreye daha duyarlı olmaya zorlamakta ve alışılmışı şekilde sadece ileri yöndeki akış faaliyetlerini planlayan üreticilerin artık satış sonrası kullanılmış ürünlerinin toplanması, geri kazanımı veya bertarafını da içeren tersine akış faaliyetlerini de planlamasını zorunlu hale getirmektedir.

Bu kapsamda, bu çalışmada, ileri ve tersine akış faaliyetlerini içinde bir arada barındıran bir kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemi ele alınmaktadır. Bu tasarım problemini çözebilmek içinse stratejik ve taktik kararların birlikte ele alındığı karma tamsayı bir matematiksel model önerilmektedir. Stratejik seviyede, üretim ve geri kazanım tesislerinin nerelere açılması gerektiğine ve halihazırda açık olan tesislerden hangile-

rinin kapatılması gerektiğine karar verilmektedir. Taktik seviyede ise üretim tesislerinde elde edilen yeni ürünlerle geri kazanım tesislerinde elde edilen yenilenmiş ürünlerin müşterilere doğru ileri yöndeki akış miktarları ile kullanılmış ürünlerin müşterilerden geri kazanım tesislerine doğru tersine yöndeki akış miktarlarına ve üretim ile geri kazanım tesislerinde işlenmesi gereken toplam ürün miktarlarına karar verilmektedir. Geliştirilen model; kapasiteli, çok ürünlü, tek periyotlu, deterministik talep ve geri dönüşlerin olduğu karma tamsayı bir yer seçimi ve dağıtım modelidir.

Bu çalışma kapsamında ikinci bölümde, kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı ile ilgili yapılan akademik çalışmalar hakkında bilgi verilmekte ve üçüncü bölümde önerilen karma tamsayı model anlatılmakta ve modelin performansını test etmek amacıyla geliştirilen örnek veri senaryosu üzerinde elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Son bölümde ise çalışma kapsamında yapılan duyarlılık analizi çalışmalarından elde edilen sonuçlar anlatılmakta ve gelecek çalışma konuları hakkında bilgi verilmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kapalı döngü tedarik zincirleri, geleneksel ileri akış ve ileri tedarik zinciri faaliyetlerine ek olarak tersine akış ve tersine tedarik zinciri faaliyetlerini de içeren tedarik zincirleridir. İleri tedarik zincirleri genel olarak hammaddeden son ürün elde edilmesi ile ilgili bir seri süreci ve bu ürünlerin müşterilere ulaştırılması ile ilgili faaliyetleri içermekteyken, tersine tedarik zincirleri ise son kullanıcıdan ürünlerin toplanarak ayrıştırma tesislerine taşınmasını, ürünün durumunu ve ekonomik olarak etkin yeniden kullanım opsiyonunu belirleyebilmek için test edilmesini, sınıflandırma ve ayrıştırma işlemlerini, ekonomik açıdan en uygun olan geri kazanım (tamir, yeniden üretim, yenileme, geri dönüşüm) veya bertaraf yöntemlerinin seçilmesi ve uygulanmasını, geri kazanılan ürünler için ise yeniden pazarlama ve dağıtım faaliyetlerini içermektedir (Guide vd., 2003). Kapalı döngü tedarik zincirlerinin ve tersine lojistiğin, tedarik zinciri yönetimi araştırmaları içerisindeki yeri son yıllarda yasal, ekonomik yahut çevresel sebeplerle oldukça artmıştır. Kapalı döngü tedarik zinciri tasarımı üzerine 1990'lı yıllardan bu yana pek çok makale yazılmıştır. Bu

çalışma kapsamında ileri ve tersine akışlar bir arada ele alındığından literatür analizi kısmında sadece kapalı döngü tedarik zinciri tasarımı kapsamındaki çalışmalara yer verilmektedir. Kapalı döngü tedarik zinciri probleminde karşılaşılan başlıca problemlerden birisi talep tahmini yapmanın zorluğudur; geri dönüşlere ilişkin güvenilir ve yeterli miktarda veri bulunamamaktadır (Araújo vd., 2012). Literatürde çalışmaların büyük çoğunluğu talep ve geri dönüşlerin deterministik olduğu varsayımında bulunarak ağ tasarımı problemini çözmüşlerdir (Marin ve Pelegrin, 1998; Jayaraman vd., 1999; Fleischmann vd., 2001). Bazı çalışmalarda ise bu problemi aşmak için talep ve geri dönüş değerleri belirli olasılık dağılımlarına uygun olarak alınmıştır (Wang vd., 2007; Listes, 2007; Salema vd., 2007).

Kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı sırasında tesis yer seçimi gibi stratejik seviyede kararlarla birlikte üretim, stok ve dağıtım planlarının oluşturulması gibi taktik seviyede kararlar da alınabilmektedir (Alumur vd. 2015). Salema vd. (2009), stratejik ve taktik kararların entegrasyonunu sağlayabilmek için makro ve mikro zaman ölçeklerini kullanmışlardır. Makro düzeyde uzun zaman aralıkları için stratejik seviyede tesis yer seçimi problemi çözülürken, mikro düzeyde ise aylık olarak dağıtım, üretim ve stok planlamaları yapılarak stratejik ve taktik kararlar birleştirilebilir (Salema vd, 2009). Ayrıca Krikke vd. (2003), tesis yer seçimi stratejik kararına ek olarak modülerlik, tamir edilebilirlik ve geri dönüşüm özellikleri gibi ürün tasarımı ile ilgili konuları da ele alarak hangi ürünlerin üretilmesi gerektiği ile ilgili stratejik kararları da çalışmalarına dahil etmişlerdir.

Stratejik seviyede sadece yer seçimi problemini çözen çalışmalarda sunulan matematiksel modeller genellikle zamana göre değişkenliğin göz ardı edildiği tek periyotlu statik modellerdir (Krikke vd, 2003; Min vd., 2006; Demirel ve Gökçen, 2008). Üretim, dağıtım ve stok planlarının oluşturulması gibi taktik seviyede kararların da alındığı çalışmalarda ise çok periyotlu dinamik modeller tercih edilmiştir (Wang vd., 2007; Ko ve Evans 2007; Salema vd., 2007; Kusumastuti vd., 2008).

Klasik ağ tasarımı problemlerinde olduğu gibi kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı da tesis açma maliyetleri, taşıma maliyetleri gibi maliyetlerin minimize edilmesi öncelikli amaçtır. Literatürde yer alan pek çok

çalışma sadece maliyetleri dikkate alarak ağ tasarımını gerçekleştirmektedir (Marin ve Pelegrin, 1998; Jayaraman vd., 1999; Fleischmann vd., 2001). Ancak az sayıda da olsa kar maksimizasyonu ve birden fazla amacın da sağlanmaya çalışıldığı çok amaçlı çalışmalarda mevcuttur (Krikke vd, 2003; Wang vd., 2007; Listes, 2007; Amin ve Zhang, 2011).

Literatürde incelenen makalelerle ilgili bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla çalışmalarda ele alınan ağın aşama sayısı, ürün sayısı, modelin dinamik mi statik mi olduğu, ağ üzerinde tanımlanan tesislerin kapasitelerinin olup olmadığı, kullanılan verilerin deterministik mi rassal mı olduğu ve çözüm yöntemi ile ilgili özet bilgiler Tablo 1’de gösterilmektedir. Bu sınıflandırma yapılırken Akçali arkadaşlarının (2009) çalışmasından faydalanılmıştır. Bu kapsamda, tamamen aynı faaliyeti yapsın yahut yapmasın benzer bir amaca hizmet eden noktalar kümesi kademe, iki ardışık kademe arasında kalan bağlantılar kümesi ise aşama olarak tanımlanmaktadır (Akçali vd, 2009). Tek periyotlu sadece bir zamanlı karar vermenin olduğu modeller statik; talep, arz ve maliyetler gibi parametrelerin zaman içerisinde değiştiği modeller ise dinamik yapıya sahip modeller olarak sınıflandırılmaktadır (Akçali vd, 2009). Talep ve arz parametrelerinin belirli olduğu yapıya sahip modeller deterministik, ilgili parametrelerin olasılıklı bir dağılıma sahip olduğu modellerle ise rassal modeller olarak sınıflandırılmaktadır (Akçali vd; 2009). Bu tanımlamalara uygun olacak şekilde Tablo 1’de 1998- 2014 yılları arasındaki makaleler sınıflandırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen model iki aşamalı, çok ürünlü, kapasiteli, deterministik ve tek periyotlu bir modeldir. Bu açıdan, Jayaraman vd. (1999), Demirel ve Gökçen (2008), ve Easwaran ve Üster’in (2010) geliştirdikleri modellerle aynı özellikleri taşımaktadır. Ancak bu çalışmalarda ele alınan modeller maliyetleri en düşürmek için sabit tesis açma, taşıma, birim üretim ve geri kazanım gibi maliyetleri göz önüne almaktadır. Bu çalışmada geliştirilen model ise diğer modellerde ele alınan maliyet kalemlerinin yanı sıra tesis kapa- ma, operasyonel maliyetler ve ek kapasite kullanım maliyetleri ile ürün satışından elde edilen gelir ve geri kazanımdan elde edilen kazancı da göz önüne alarak kârı en büyükmeyi hedeflemektedir. Literatür çalışmasında

Tablo 1. Kapalı Döngü Tedarik Zinciri ile İlgili Makalelerin Sınıflandırılması

Makale	Aşama	Statik/ Dinamik	Ürün Sayısı	Kapasite Durumu	Deterministik / Stokastik	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Yöntemi
Marin ve Pelegrin (1998)	1	Statik	Tek	Kapasitesiz	Deterministik	Min.	Kesin ve Sezgisel (B&B ve Lagrange Ayırıştırması)
Jayaraman vd. (1999)	2	Statik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Min.	Kesin (CPLEX)
Fleischmann vd. (2001)	2	Statik	Tek	Kapasitesiz	Deterministik	Min.	Kesin (CPLEX)
Krikke vd. (2003)	2	Statik	Çok	Kapasitesiz	Deterministik	Çok amaçlı	Kesin (Hedef Programlama)
Beamon ve Fernandes (2004)	2	Dinamik	Tek	Kapasiteli	Deterministik	Min.	Kesin
Min vd. (2006)	2	Statik	Tek	Kapasiteli	Deterministik	Min.	Sezgisel (Genetik Algoritma)
Salema vd. (2006)	2	Statik	Çok	Kapasitesiz	Deterministik	Min.	Kesin (CPLEX)
Sahyouni vd. (2007)	1	Statik	Tek	Kapasitesiz	Deterministik	Min.	Sezgisel (Lagrange Gevşetmesi)
Wang vd. (2007)	2	Dinamik	Tek	Kapasitesiz	Stokastik	Çok amaçlı	Sezgisel (İki Aşamalı Programlama)
Ko ve Evans (2007)	2	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Min.	Sezgisel (Genetik Algoritma)
Listes (2007)	2	Statik	Tek	Kapasiteli	Stokastik	Maks.	Sezgisel (Ayırıştırma)
Lu ve Bostel (2007)	2	Statik	Tek	Kapasitesiz	Deterministik	Min.	Sezgisel (Lagrange)
Salema vd. (2007)	2	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Stokastik	Min.	Kesin (CPLEX)
Demirel ve Gökçen (2008)	2	Statik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Min.	Kesin (CPLEX)
Kusumastuti vd. (2008)	3	Dinamik	Tek-Çok bileşen	Kapasiteli	Deterministik	Min.	Kesin (Lingo)
Lee ve Dong (2008)	2	Statik	Tek	Kapasiteli	Deterministik	Min.	Sezgisel (İki Aşamalı Tabu Arama)
Salema vd. (2009)	2	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Maks.	Kesin (CPLEX)
Pishvae ve Torabi (2010)	2	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Stokastik	Çok amaçlı	Sezgisel (İki Aşamalı-Bulanık Yöntem)
Salema vd. (2010)	2	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Min.	Kesin (CPLEX)
Wang ve Wei (2010)	3	Statik	Tek	Kapasiteli	Deterministik	Min.	Sezgisel (Genetik Algoritma)
Easwaran ve Üster (2010)	2	Statik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Min.	Kesin (Benders Ayırıştırması)
Lundin (2012)	2	Dinamik	Tek	Kapasiteli	Deterministik - Taşımalarda risk durumları için olasılık değerleri var	Min.	Kesin (Zaman Yayımlı Minimum Maliyet Akış Modeli)
Amin ve Zhang (2013)	2	Statik	Çok	Kapasiteli	Deterministik - Alternatif model stokastik	Çok amaçlı	Kesin (CPLEX)
Wei ve Zhao (2013)	2	Statik	Tek	Kapasitesiz	Stokastik	Maks.	Sezgisel (Oyun ve Bulanık Teori)
Fahimniaa vd. (2013)	2	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Min.	Kesin (CPLEX)
Ramezani vd. (2014)	3	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Stokastik	Çok amaçlı	Kesin (CPLEX)
Özceylan vd. (2014)	3	Dinamik	Tek-Çok bileşen	Kapasiteli	Deterministik	Min.	Kesin (COIN/BONMIN)

incelenen, kesin yöntemlerle çözülen tek periyotlu, tek ünlü ve kapasitesiz diğer jenerik modeller ise Marin ve Pelegrin (1998), Fleischmann vd. (2001) tarafından geliştirilmiştir. Marin ve Pelegrin (1998) tarafından geliştirilen model, tek aşamalı bir modeldir. Fleischmann vd. (2001) ise bu çalışmada geliştirilen modelde olduğu gibi iki aşamalıdır. Ancak model tek ünlü ve kapasitesizdir. Bu sebeple, bu çalışmada ele alınan model çok ünlü ve kapasiteli yapısıyla gerçek hayatta karşılaşılan problemleri daha iyi yansıtmaktadır.

3. PROBLEM TANIMI

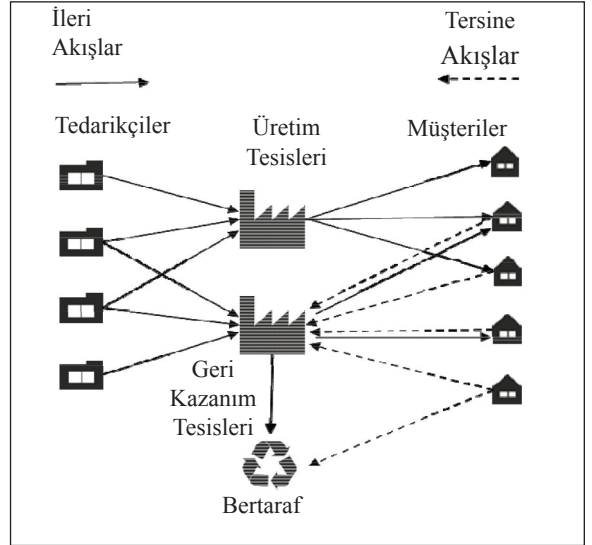
İleri ve tersine yöndeki akışları bir arada ele alan kapalı döngü bir tedarik zinciri ağında, tedarikçilerden temin edilen hammadde, parça ve bileşenler üretim tesislerinde işlenerek yeni ürünler elde edilir ve bu ürünler müşteri taleplerini karşılamak üzere müşterilere iletilir. Müşteriye ulaşan ürünler kullanım veya ürün ömrünün dolması, arızalanma gibi sebeplerle kullanılmış ürün haline gelir ve üreticilere geri iletilir. Üreticiler, geri gönderilen bu ürünleri yasalarca belirlenen minimum gereklilikleri sağlayacak şekilde geri kazanır veya bertaraf eder. Geri kazanım sonrası yeni ürün elde edilir ve bu ürünlerle tekrar müşteri taleplerinin karşılanması sağlanır. Bertaraf edilmesine karar verilen ürünler ise yok edilerek üretici ve müşteri arasında oluşan bu döngüyü terk eder. Bahsedilen akışlar ve ele alınan kapalı döngü tedarik zinciri ağı Şekil 1’de yapısal olarak gösterilmektedir.

Bu çalışmada, kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemi ele alınmaktadır. Bu kapsamda, ileri akış içerisinde potansiyel üretim tesislerinden hangilerinin açılacağına, açık olan mevcut tesislerden hangilerinde üretime devam edileceğine hangilerinin ise kapatılması gerektiğine, müşteri taleplerini karşılamak üzere ne kadar miktarda ürünün hangi üretim opsiyonu ile üretileceğine ve tedarikçilerden ne kadar hammadde sağlanması gerektiğine karar verilmektedir. Aynı şekilde, tersine akış ile ilgili olarak da potansiyel geri kazanım tesislerinden hangilerinin açılacağına ve açık olanlarından hangilerinin kapatılacağına, yasalarca zorunlu olarak toplanması gereken minimum miktar karşılanacak şekilde ne kadar kullanılmış ürünün toplanacağına ve bu ürünlerin hangi geri kazanım opsiyonları ile işlem göreceğine karar

verilmektedir. Bu kararlar verilirken amaç toplam kârın en büyüklenmesidir.

Problemde birçok farklı tesis ve ağ topolojisi ele alınabilmektedir. Problemdeki tesisler seçilebilir ve seçilemez olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Seçilebilir tesisler ilgili üretim ve geri kazanım işlemleri için mevcut ve potansiyel tesisler olarak ayrıca ikiye ayrılmaktadır. Seçilebilecek mevcut tesisler için işletme/kapatma, seçilebilecek potansiyel tesisler için ise yer seçimi kararları verilmelidir. Seçilemeyecek tesisler müşterileri kapsamaktadır ve bu kümedeki tesisler için herhangi bir işletim maliyeti bulunmamaktadır.

Problem çok ünlü olarak ele alınmaktadır. Bu kapsamda birden farklı ürün olabileceği gibi, tek bir ürünün farklı halleri (yeni ürün, kullanılmış ürün, yenilenmiş ürün gibi) de problemde ayrıca göz önüne alınabilmektedir. Bir sonraki kısımda problem için oluşturulan matematiksel model sunulmaktadır.



Şekil 1. Kapalı Döngü Bir Tedarik Zinciri Ağı

3.1 Karma Tamsayı Matematiksel Model

Problem, çok ünlü, kapasite kısıtlı, deterministik taleplere sahip, birden fazla üretim ve geri kazanım opsiyonuna olanak tanıyan iki aşamalı doğrusal karma bir tamsayı programlama problemi olarak modellenmiştir. Problemin çözümü için geliştirilen karma tamsayı matematiksel modelde kullanılan parametreler aşağıda sunulmaktadır.

Kümeler:

- P : Ürünler kümesi
 M : Üretim opsiyonları kümesi
 R : Geri kazanım opsiyonları kümesi
 I_m^e : $m \in M$ üretim opsiyonu gerçekleştirilen mevcut tesisler kümesi
 I_m^n : $m \in M$ üretim opsiyonu için potansiyel tesisler kümesi
 I_m : $m \in M$ üretim opsiyonu için seçilebilir tesisler kümesi: $I_m = I_m^e \cup I_m^n$
 J_m : $m \in M$ üretim opsiyonu için seçilemeyecek tesisler kümesi
 L_m : $m \in M$ üretim opsiyonu için tüm tesisler kümesi: $L_m = I_m \cup J_m$
 I_r^e : $r \in R$ geri kazanım opsiyonu gerçekleştirilen mevcut tesisler kümesi
 I_r^n : $r \in R$ geri kazanım opsiyonu için potansiyel tesisler kümesi
 I_r : $r \in R$ geri kazanım opsiyonu için seçilebilir tesisler kümesi: $I_r = I_r^e \cup I_r^n$
 J_r : $r \in R$ geri kazanım opsiyonu için seçilemeyecek tesisler kümesi
 L_r : $r \in R$ geri kazanım opsiyonu için tüm tesisler kümesi: $L_r = I_r \cup J_r$
 I : Tüm seçilebilir tesisler kümesi: $I = I_r \cup I_m$
 J : Tüm seçilemeyecek tesisler kümesi (mesela müşteriler)
 L : Tüm tesisler kümesi: $L = L_m \cup L_r$

Parametreler:

- d_{lp} : $p \in P$ ürünü için $l \in L$ noktasının talebi
 g_{lp} : $l \in L$ noktasında ortaya çıkan $p \in P$ ürünü miktarı
 a_{mqp} : $m \in M$ üretim yöntemiyle bir adet $q \in P$ ürünü üretmek için kullanılması gereken $p \in P$ ürünü miktarı
 β_{rqp} : $r \in R$ geri kazanım yöntemiyle bir adet $q \in P$ ürünü geri kazanıldığında ortaya çıkan $p \in P$ ürünü miktarı
 K_{ml} : $l \in I_m$ tesisinde kullanılabilir $m \in M$ üretim opsiyonunun kapasitesi
 K_{rl} : $l \in I_r$ tesisinde kullanılabilir $r \in R$ geri kazanım opsiyonunun kapasitesi
 EK_{ml} : $l \in I_m$ tesisinde kullanılabilir $m \in M$ üretim opsiyonunun artırılabilir en yüksek kapasitesi
 EK_{rl} : $l \in I_r$ tesisinde kullanılabilir $r \in R$ geri kazanım opsiyonunun artırılabilir en yüksek kapasitesi
 RT_{rp} : $r \in R$ opsiyonu ile geri kazanılması gereken $p \in P$ ürünü için hedeflenen miktar

Maliyetler:

- FC_{ml} : $m \in M$ üretim opsiyonunun $l \in I_m^n$ tesisinde kullanılmaya başlamasının sabit maliyeti
 FC_{rl} : $r \in R$ geri kazanım opsiyonunun $l \in I_r^n$ tesisinde kullanılmaya başlamasının sabit maliyeti
 SC_{ml} : Halihazırda $l \in I_m^e$ tesisinde yürütülen $m \in M$ üretim opsiyonunun kaldırılmasının sabit maliyeti
 SC_{rl} : Halihazırda $l \in I_r^e$ tesisinde yürütülen $r \in R$ geri kazanım opsiyonunun kaldırılmasının sabit maliyeti
 OC_{ml} : $m \in M$ üretim opsiyonunun $l \in L_m$ tesisinde kullanılmasının sabit operasyon maliyeti
 OC_{rl} : $r \in R$ geri kazanım opsiyonunun $l \in L_r$ tesisinde kullanılmasının sabit operasyon maliyeti
 PC_{lp} : $l \in L$ tesisinde $p \in P$ ürününün dışarıdan satın alınmasının maliyeti
 MC_{mlp} : $l \in L_m$ tesisinde $m \in M$ üretim yöntemiyle üretilen bir birim $p \in P$ ürününün üretim maliyeti
 RC_{rlp} : $l \in L_r$ tesisinde $m \in R$ geri kazanım yöntemiyle bir birim $p \in P$ ürününü geri kazanmanın maliyeti

- $TC_{ll'p}$: $p \in P$ ürününü $l \in L$ tesisinden $l' \in L$ tesisine taşımamanın birim maliyeti
 EC_{ml} : $l \in I_m$ tesisinde kullanılabilecek $m \in M$ üretim opsiyonunun kapasitesini bir birim arttırmanın maliyeti
 EC_{rl} : $l \in I_r$ tesisinde kullanılabilecek $r \in R$ geri kazanım opsiyonunun kapasitesini bir birim arttırmanın maliyeti
 DC_{lp} : $l \in L$ noktasının $p \in P$ ürünü için karşılanamayan talebinin birim ceza maliyeti
 RE_{lp} : $l \in L$ noktasından $p \in P$ ürününün talebinin karşılanmasından elde edilen birim gelir
 RE_{rlp} : $l \in L$ tesisinde $r \in R$ geri kazanım opsiyonu ile geri kazanılan $p \in P$ ürününden elde edilen birim gelir

Karar Değişkenleri:

- y_{ml} : $\begin{cases} 1, & l \in I_m \text{ tesisinde } m \in M \text{ üretim opsiyonu kullanılırsa,} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
 y_{rl} : $\begin{cases} 1, & l \in I_r \text{ tesisinde } r \in R \text{ geri kazanım opsiyonu kullanılırsa,} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$
 s_{lp} : $l \in L$ tesisinde dışarıdan satın alınan $p \in P$ ürünü miktarı
 z_{mlp} : $l \in L_m$ tesisinde $m \in M$ üretim opsiyonu ile üretilen $p \in P$ ürünü miktarı
 v_{rlp} : $l \in L_r$ tesisinde $r \in R$ geri kazanım opsiyonu ile geri kazanılan $p \in P$ ürünü miktarı
 $x_{ll'p}$: $l \in L$ tesisinden $l' \in L$ tesisine taşınan $p \in P$ ürünü miktarı
 w_{ml} : $l \in I_m$ tesisinde $m \in M$ üretim opsiyonu için kullanılan ekstra kapasite miktarı
 w_{rl} : $l \in I_r$ tesisinde $r \in R$ geri kazanım opsiyonu için kullanılan ekstra kapasite miktarı
 u_{lp} : $l \in L$ noktasında $p \in P$ ürününün karşılanamayan talebinin miktarı

Yukarıda tanımlanan parametre ve karar değişkenleri kullanılarak oluşturulan matematiksel model aşağıda sunulmaktadır:

Matematiksel Model:

$$\begin{aligned}
 \text{Max} \quad & \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} RE_{lp} (d_{lp} - u_{lp}) + \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} RE_{rlp} v_{rlp} \\
 & - \left\{ \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m^n} FC_{ml} y_{ml} + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r^n} FC_{rl} y_{rl} \right. \\
 & + \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m^e} SC_{ml} (1 - y_{ml}) + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r^e} SC_{rl} (1 - y_{rl}) \\
 & + \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m} OC_{ml} y_{ml} + \sum_{m \in M} \sum_{l \in J_m} OC_{ml} + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r} OC_{rl} y_{rl} \\
 & + \sum_{r \in R} \sum_{l \in J_r} OC_{rl} + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} PC_{lp} s_{lp} + \sum_{m \in M} \sum_{l \in L_m} \sum_{p \in P} MC_{mlp} z_{mlp} \\
 & + \sum_{r \in R} \sum_{l \in L_r} \sum_{p \in P} RC_{rlp} v_{rlp} + \sum_{l \in L} \sum_{l' \in L \setminus \{l\}} \sum_{p \in P} TC_{ll'p} x_{ll'p} \\
 & \left. + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} DC_{lp} u_{lp} + \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m} EC_{ml} w_{ml} + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r} EC_{rl} w_{rl} \right\}
 \end{aligned} \tag{1}$$

s.t.

$$\begin{aligned}
 g_{lp} + s_{lp} + \sum_{m \in M} z_{mlp} + \sum_{r \in R} \sum_{q \in P} \beta_{rqp} v_{rlq} + \sum_{l' \in L \setminus \{l\}} x_{l'l p} \\
 = \sum_{m \in M} \sum_{q \in P} a_{mqp} z_{mlq} + \sum_{r \in R} v_{rlp} \quad \forall l \in L, p \in P \quad (2) \\
 + \sum_{l' \in L \setminus \{l\}} x_{l'l p} + d_{lp} - u_{lp}
 \end{aligned}$$

$$u_{lp} \leq d_{lp} \quad \forall l \in L, p \in P \quad (3)$$

$$s_{lp} \leq M \sum_{m \in M} y_{ml} \quad \forall l \in I_m, p \in P \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} z_{mlp} \leq K_{ml} y_{ml} + w_{ml} \quad \forall m \in M, l \in I_m \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P} z_{mlp} \leq K_{ml} \quad \forall m \in M, l \in J_m \quad (6)$$

$$\sum_{p \in P} v_{rlp} \leq K_{rl} y_{rl} + w_{rl} \quad \forall r \in R, l \in I_r \quad (7)$$

$$\sum_{p \in P} v_{rlp} \leq K_{rl} \quad \forall r \in R, l \in J_r \quad (8)$$

$$\sum_{l \in L_r} v_{rlp} \geq RT_{rp} \quad \forall r \in R, p \in P \quad (9)$$

$$w_{ml} \leq EK_{ml} y_{ml} \quad \forall m \in M, l \in I_m \quad (10)$$

$$w_{rl} \leq EK_{rl} y_{rl} \quad \forall r \in R, l \in I_r \quad (11)$$

$$x_{l'l p} \leq M \sum_{m \in M} y_{ml} \quad \forall l \in I_m, l' \in L \setminus \{l\}, p \in P \quad (12)$$

$$x_{l'l p} \leq M \sum_{m \in M} y_{ml'} \quad \forall l \in L \setminus \{l'\}, l' \in I_m, p \in P \quad (13)$$

$$x_{l'l p} \leq M \sum_{r \in R} y_{rl} \quad \forall l \in I_r, l' \in L \setminus \{l\}, p \in P \quad (14)$$

$$x_{l'l p} \leq M \sum_{r \in R} y_{rl'} \quad \forall l \in L \setminus \{l'\}, l' \in I_r, p \in P \quad (15)$$

$$z_{mlp} = 0 \quad \forall l \in L \setminus L_m, m \in M, p \in P \quad (16)$$

$$v_{rlp} = 0 \quad \forall l \in L \setminus L_r, r \in R, p \in P \quad (17)$$

$$y_{ml}, y_{rl} \in \{0,1\} \quad \forall m \in M, r \in R, l \in L \quad (18)$$

$$s_{lp}, z_{mlp}, v_{rlp}, x_{l'l p}, w_{rl}, w_{ml}, u_{lp} \geq 0 \quad \forall m \in M, r \in R, l \in L, p \in P \quad (19)$$

Amaç fonksiyonu (1) toplam kârı maksimize etmektedir. Toplam kâr; yeni üretilen ve geri kazanım yöntemleriyle elde edilen ürünlerden elde edilen gelirlerin toplamından, açılacak olan tesislerin sabit maliyetleri, mevcut tesislerin kapatılmasına ilişkin sabit maliyetler, açılacak olan tesislerin operasyonel maliyetleri, mevcut tesislerin operasyonel maliyetleri, satın alma, kapasite artırımı ve karşılanamayan talebe ilişkin ceza maliyetlerinin tümünün toplamının çıkarılması ile elde edilmektedir.

Akış dengesi kısıtları (2), her bir tesis ve ürün için yazılmaktadır. Bir tesiste dışarıdan satın alınan, ortaya çıkan, üretilen ve bir başka ürünün geri kazanımdan elde edilen ürün miktarı ile o tesise başka tesislerden gelen ürünlerin toplamı, o noktanın karşılanan talebi ile bir başka ürün üretilirken kullanılan, geri kazanıma gönderilen ve bir başka tesise iletilen ürün miktarlarının toplamına eşit olmalıdır.

Kısıt (3), karşılanamayan talep miktarının, o ürüne olan talepten daha büyük bir değer almasını engellemektedir. Kısıt (4), bir tesis tarafından bir ürünün dışarıdan temininin ancak o tesiste en az bir üretim opsiyonu faaliyette ise gerçekleşmesine izin vermektedir.

Kısıt (5) ve (8), kapasite kısıtlarıdır. Kısıt (5), bir üretim opsiyonu için seçilebilecek tesislerde üretilen ürün miktarı, eğer o tesis açılırsa, o tesisin normal ve ek kapasiteleri toplamından fazla olmamasını sağlamaktadır. Kısıt (6), üretim faaliyetlerinin yürütüldüğü seçilemeyecek mevcut tesislerdeki kapasitenin aşılmasını engellemektedir. Kısıt (7), geri kazanım opsiyonu için seçilebilecek tesislerde geri kazanımla elde edilecek olan ürün miktarının o tesisin normal ve ek kapasiteleri toplamından fazla olmamasını sağlamaktadır. Kısıt (8), geri kazanım faaliyetlerinin yürütüldüğü seçilemeyecek mevcut tesislerdeki kapasitenin aşılmasını engellemektedir.

Kısıt (9), geri kazanım yöntemiyle üretilmesi gereken ürün miktarının yasalarca belirlenen hedefi karşılamasını sağlamaktadır. Kısıt (10) ve (11) üretim ve geri kazanım opsiyonları için seçilebilecek olan tesislerdeki ek kapasite sınırlarının aşılmasını engellerken aynı zamanda açık olmayan tesislere ek kapasite alınmamasını sağlamaktadır.

Kısıt (12) ve (15), ürün akışlarının sadece açık olan tesisler arasında veya tesislerden müşterilere ya da müşterilerden tesislere doğru olmasını sağlamaktadır. Kısıt (12), ancak açık olan bir üretim tesisinden herhangi bir tesise veya müşteriye taşıma yapılabilmesini sağlamaktadır. Kısıt (13), herhangi bir tesisten veya müşteriden, bir üretim tesisine taşıma yapılabilmesi için o üretim tesisinin en az bir üretim opsiyonu için seçilmiş olması gerektiğini söylemektedir. Açılmış olan üretim tesisleri arasında akışa izin veren bu kısıtlar, kısıt (14) ve (15) ile geri kazanım opsiyonları için de aynı şekilde yazılmıştır.

Kısıt (16) ve (17), bir üretim veya geri kazanım opsiyonunun sadece bu opsiyonlara uygun olan seçilebilecek ilgili tesisler kümesinde yer alan tesisler dışında başka tesislerde yapılmasını engellemektedir. Kısıt (18) ve (19) ise işaret kısıtlarıdır.

Çalışmanın bir sonraki kısmında burada verilen matematiksel modelin örnek bir uygulama üzerinde çözümünden bahsedilmektedir.

3.2 Modelin Uygulanması

Bu bölümde, geliştirilen matematiksel modelin performansını test etmek amacıyla oluşturulan örnek veri kümesi ile modelin GAMS/CPLEX 12.5.1.0 yazılımı ile optimal olarak çözdürülmesi sonucunda elde edilen sonuçlar aktarılmaktadır.

Oluşturulan örnek veri kümesinde tek ürün, fabrika ve katı atık sahası olmak üzere iki mevcut tesis, on tane potansiyel üretim tesisi, on tane potansiyel geri kazanım tesisi ve elli adet müşteri bulunmaktadır. Müşteri talepleri ve ürün geri dönüşleri 0 ile 100 arasında değişen düzgün dağılıma sahip sayılar ($\sim U[0,100]$) olarak alınmıştır. Üretim ve geri kazanım tesislerinin ürün işleme kapasiteleri 1000, ek kapasiteleri ise 250 birim olarak alınmıştır. Yeni tesis açma maliyeti 10.000 avro, mevcut tesisi kapatma maliyeti ise 5.000 avro'dur. Tesis açıldığında bir defaya mahsus ödenmesi gereken operasyonel maliyetler 100 avro, bir birim yeni ürün üretmenin ve kullanılmış ürün yenilenmesinin maliyeti 1 avro olarak alınmıştır. Bir birim ürünü imha etme maliyeti ise 3 avro'dur. Ürün iki bileşen kullanılarak üretilmektedir ve bir bileşeni satın almanın maliyeti 1 avro olarak alınmıştır. Tesislerde

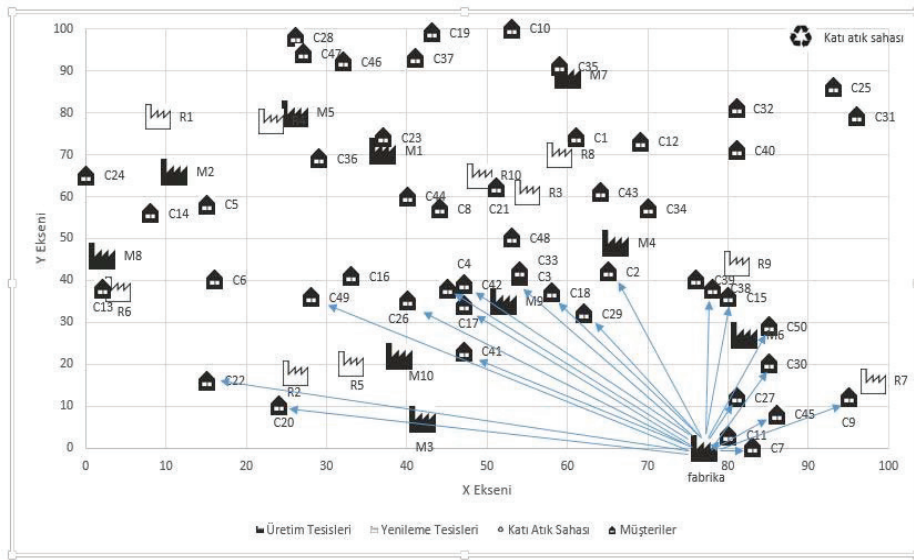
normal kapasitenin aşılması durumunda kapasiteyi bir birim artırmanın maliyeti 10 avro'dur.

Bir birim yeni ürün satışından 100 avro, yenilenmiş ürün satışından ise 50 avro kazanılmaktadır. Müşteri talebini karşılamamanın birim ceza maliyeti 100 avro'dur.

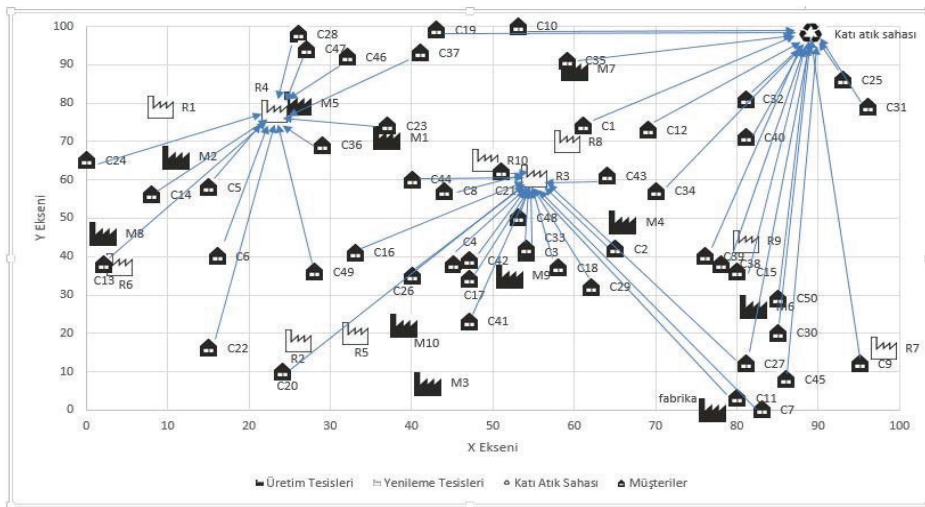
Ağ üzerindeki tüm noktalar X ve Y düzleminde [0,100] arasında düzgün dağılımla değişen koordinat değerleri almaktadır. Noktalar arasındaki mesafeler Öklid mesafesi ile hesaplanmaktadır. Bir birim ürünü 1 km taşımamanın maliyeti ise 0,005 avro alınmıştır.

Tablo 2. Örnek Veri Kümesi İçin Sonuç Özet Tablosu

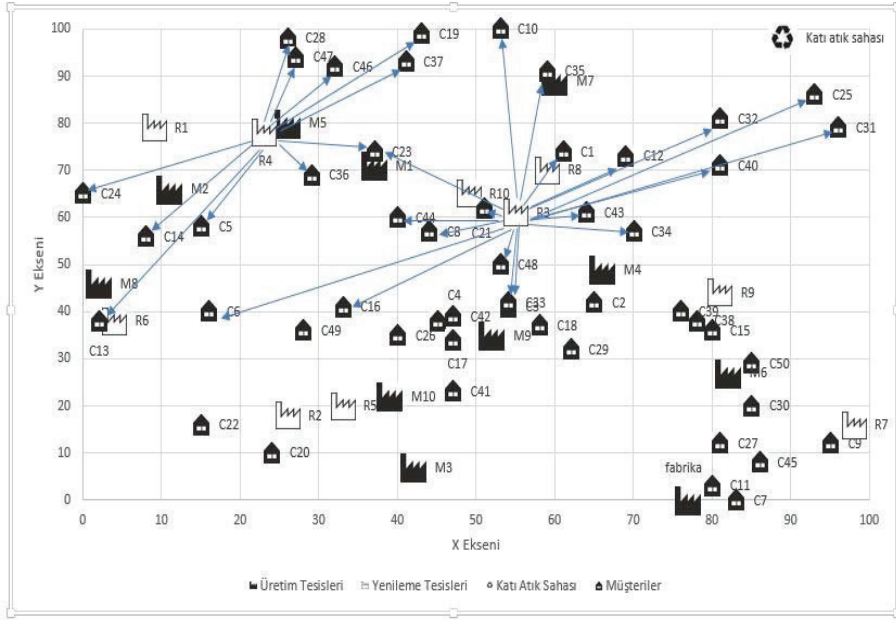
Amaç Fonksiyonu Değeri	CPU Zamanı (saniye)	Açılan Üretim Tesisleri	Açılan Geri Kazanım Tesisleri
170.827	20,69	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4



Şekil 2. Seçilen Üretim Tesislerinden Müşterilere İleri Yönde Ürün Akışı



Şekil 3. Kullanılmış Ürünlerin Müşterilerden Seçilen Yenileme Tesislerine ve Katı Atık Sahasına Doğru Tersine Akışı



Şekil 4. Geri Kazanım Tesislerinde Yenilenmiş Olan Ürünlerin Müşterilere Doğru İleri Yönlü Akışı

Örnek veri kümesinin GAMS/CPLEX 12.5.1.0 yazılımı ile optimal olarak çözdürülmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 2’de görülmektedir. Üretim tesisi olarak mevcut üretim tesisi olan fabrikanın açık kalmasına karar verilmiştir. Fabrikadan müşterilere doğru olan ileri yönlü ürün akışı Şekil 2’de görülmektedir. Geri kazanım tesisi olarak ise R3 ve R4 tesisleri açılmış, bertaraf tesisi olarak katı atık sahası açık kalmaya devam etmiştir. Şekil 3’te, müşterilerden geri kazanım tesislerine ve katı atık sahasına olan kullanılmış ürün akışı görülmektedir. Şekil 4’te ise geri kazanım tesislerinde yenilenmiş olan ürünlerin müşterilere doğru olan ileri akışı görülmektedir.

3.3 Duyarlılık Analizi

Bir önceki bölümde, kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı için önerilen karma tamsayı programla-

ma modelinin örnek bir senaryo üzerindeki çözümü incelenmiştir. Bu kısımda ise oluşturulan model için belirlenen parametre değerlerindeki değişimin, problemin optimal çözümü ve ağ tasarımı üzerine olan etkileri incelenmektedir.

3.3.1 Sabit Tesis Açma Maliyetlerindeki Değişimler

Sabit tesis açma maliyetlerindeki değişimin kapasite değerlerinin geniş, orta ve dar olduğu durumlardaki etkileri incelenmektedir. Bu kapsamda yapılan analizlerde geniş, orta ve dar olmak üzere üç farklı kapasite kümesi kullanılmaktadır. Tablo 3’te ilgili kapasite kümelerindeki kapasite değerleri sunulmaktadır.

Tablo 3’te verilen geniş, orta ve dar kapasite kümelerine göre sabit tesis açma maliyetleri 5.000-15.000 avro değerleri arasında değiştirilerek model çözdürülmüş ve bu değişimlerin amaç fonksiyonu, CPU zamanı ve ağ

Tablo 3. Kapasite Kümeleri

Kapasite	Üretim Tesisi	Geri Kazanım Tesisi	Üretim İçin Ek Kapasite	Geri Kazanım İçin Ek Kapasite
Geniş Kapasite	2.000	2.000	500	500
Orta Kapasite	1.000	1.000	250	250
Dar Kapasite	500	500	125	125

tasarımı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Tablo 4’te görüldüğü üzere, geniş kapasiteli durumda sabit tesis açma maliyetleri ağ tasarımı üzerinde hiçbir etki yapmamıştır. Tüm sabit maliyet değerleri ile fabrika, katı atık sahası ve R10 tesislerinin açılmasına karar verilmiş ve herhangi bir ek kapasite kullanılmamıştır. Bu durum geniş kapasite kümesinin sabit maliyet değerlerine karşı gürbüz olduğunu göstermektedir. Tablo 4'te sunulan CPU zamanları da birbirine çok yakın değerdedir. Tüm optimal çözümler bir saniyenin altında elde edilmiştir.

Tablo 5’te görüldüğü üzere, orta kapasite kümesi ile sabit tesis açma maliyetleri 7.000-15.000 avro aralığındayken ağ yapısında herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Tesis açmanın sabit maliyeti 5.000 ve 6.000 avro olduğu durumda ise yeni bir üretim tesisi açılmasına karar verilmiştir. Dar kapasite kümesi ile Tablo 6’da görüldüğü üzere, orta kapasite kümesi ile olduğu gibi, sabit tesis açma maliyetinin 7.000-15.000 avro olduğu aralıkta ağ yapısında herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Tüm sabit maliyet değerleri ile açılan geri kazanım

Tablo 4. Geniş Kapasite Kümesi ile Sabit Maliyet Değerlerindeki Değişim

Sabit Maliyet	Amaç Fonksiyonu	CPU Zamanı (sn)	Açılan Üretim Tesisleri	Açılan Geri Kazanım Tesisleri	Toplam Ek Kapasite Kullanımı
15.000	189.979	0,98	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
14.000	190.979	0,98	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
13.000	191.979	0,97	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
12.000	192.979	0,97	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
11.000	193.979	0,97	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
10.000	194.979	0,92	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
9.000	195.979	0,97	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
8.000	196.979	0,97	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
7.000	197.979	0,95	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
6.000	198.979	0,98	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
5.000	199.979	0,95	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0

Tablo 5. Orta Kapasite Kümesi ile Sabit Maliyet Değerlerindeki Değişim

Sabit Maliyet	Amaç Fonksiyonu	CPU Zamanı (sn)	Açılan Üretim Tesisleri	Açılan Geri Kazanım Tesisleri	Toplam Ek Kapasite Kullanımı
15.000	160.827	17,09	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
14.000	162.827	11,98	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
13.000	164.827	19,42	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
12.000	166.827	14,80	Fabrika	Katı atık sahası, R3,R4	385
11.000	168.827	13,54	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
10.000	170.827	20,69	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
9.000	172.827	18,99	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
8.000	174.827	19,61	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
7.000	176.827	22,75	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
6.000	179.395	14,40	Fabrika, M1	Katı atık sahası, R5, R9	250
5.000	182.396	14,82	Fabrika, M1	Katı atık sahası, R5, R9	250

Tablo 6. Dar Kapasite Kümesi ile Sabit Maliyet Değerlerindeki Değişim

Sabit Maliyet	Amaç Fonksiyonu	CPU Zamanı (sn)	Açılan Üretim Tesisleri	Açılan Geri Kazanım Tesisleri	Toplam Ek Kapasite Kullanımı
15.000	103.110	4,79	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	345
14.000	107.110	8,52	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	345
13.000	111.110	6,77	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	345
12.000	115.110	4,87	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	345
11.000	119.110	4,87	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	345
10.000	123.110	6,24	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	345
9.000	127.110	10,02	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	355
8.000	131.110	8,66	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	355
7.000	135.110	5,07	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	355
6.000	139.477	13,64	Fabrika, M9	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	230
5.000	144.477	20,78	Fabrika, M9	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	230

tesisleri aynıdır; ancak, sabit maliyetin 5.000 veya 6.000 olduğu durumda yeni bir üretim tesisinin açılmasına karar verilmektedir. Kapasite değerleri ile açılan tesis sayısı arasındaki ters orantılı ilişki sonuçlardan görülmektedir. Geniş kapasitede en az sayıda tesis ile müşteri talebi karşılanırken, dar kapasitede müşteri taleplerini karşılayabilmek için diğer kapasite değerlerine nazaran daha fazla tesise ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

Genel olarak, tüm kapasite kümeleri ile sabit tesis açma maliyetlerinin artması yahut azalmasının açılan geri kazanım tesisi sayısı üzerinde bir etkisinin olmadığı, ancak maliyetlerin 5.000-6.000 avro seviyelerine düştüğü durumlarda yeni bir üretim tesisinin açılmasına karar verildiği görülmektedir. Beklendiği gibi en yüksek amaç fonksiyonu değerine, yani en yüksek kâra sabit maliyetin en az olduğu durumda geniş kapasite kümesi ile ulaşılmaktadır. En kötü sonuç ise dar kapasite kümesi ile sabit maliyetin en fazla olduğu durumda gözlenmiştir. Her üç tabloda da görüldüğü üzere, kapasite değerleri aynı iken tesis açma sabit maliyetlerinin artması amaç fonksiyonunun, yani toplam kârın azalmasına sebep olmuştur.

3.3.2 Talep ve Geri Dönüş Miktarlarındaki Değişimler

Talep ve geri dönüş miktarlarındaki değişimin elde edilen sonuçları nasıl etkilediğini görebilmek amacıyla talep ve geri dönüş miktarları değiştirilerek on farklı senaryo üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 7’de sunulmaktadır. Senaryo 1, modelin çözümünde kullandığımız örnek veri setine aittir. İki ile on arasındaki her bir senaryoda müşterilerin talepleri ve geri dönüş miktarları 0 ile 100 arasındaki düzgün dağılımdan rastgele seçilen değerler olarak alınmıştır. On birinci senaryoda ise talep ve geri dönüş miktarları tam 100 olarak kabul edilmiştir. Her bir senaryo için minimum geri kazanım oranı %50 olarak alınmıştır.

Tüm senaryolarda fabrika ve katı atık sahası açılmaktadır; bu iki tesis haricinde geri kazanım tesisi R3’ün de sıklıkla açıldığı görülmektedir. On birinci senaryo hariç diğer tüm senaryolarda toplamda dört tesis açılmıştır, on birinci senaryoda ise fazladan bir tesis daha açılması gerekmiştir. Talep ve geri dönüş değerlerinin değişimleri tedarik zinciri ağ yapısını çok fazla etkilemezken,

Tablo 7. Talep ve Geri Dönüş Miktarlarındaki Değişimin Etkileri

Senaryo	Amaç Fonksiyonu	CPU Zamanı (sn)	Açılan Üretim Tesisleri	Açılan Geri Kazanım Tesisleri	Toplam Ek Kapasite Kullanımı
1 (Örnek Senaryo)	170.827	21,28	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
2	163.801	20,44	Fabrika,M7	Katı atık sahası, R5	193
3	164.237	14,51	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R6	352
4	175.852	22,23	Fabrika,M9	Katı atık sahası, R10	221
5	163.333	19,24	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	363
6	117.630	1,40	Fabrika	Katı atık sahası, R5, R10	290
7	140.791	2,72	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R6	261
8	150.531	4,98	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	383
9	163.824	8,44	Fabrika	Katı atık sahası, R6, R10	499
10	157.799	11,05	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R6	482
11	256.973	8,64	Fabrika	Katı atık sahası, R4, R5, R9	1250

tersine tedarik zinciri ağ tasarımının bu değişimlerden çok daha fazla etkilendiği görülmektedir.

3.3.3 İleri ve Tersine Tedarik Zinciri Ağı Tasarımı Problemlerinin Bağımsız ve Entegre Çözümlerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada geliştirilen matematiksel model, hali hazırda hem ileri hem de tersine yöndeki tedarik zinciri ağ tasarımı problemlerini birbirinden bağımsız olarak çözebilmektedir. Bu problemlerin bir arada ele alınması ile kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı problemi çözülmektedir. Bu kısımda, ileri ve tersine yöndeki tedarik zinciri ağ tasarımı problemlerinin bağımsız olarak çözüldüğü durum ile kapalı döngü tedarik zinciri ağ

tasarımı probleminin tek başına çözümü ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır.

İleri yöndeki tedarik zinciri ağ tasarımı problemi oluşturabilmek için müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürün miktarları (g_p) ve geri kazanılması gereken minimum ürün miktarı oranı (RT_{rp}) değerleri sıfır olarak alınmıştır. İleri yönlü tedarik zinciri ağ tasarımı problemi kapsamında müşteri taleplerini karşılamak üzere hangi üretim tesislerinin açılması gerektiğine ve üretim tesislerinden müşterilere yeni ürün akışının nasıl olacağına karar verilmektedir.

Tersine yöndeki tedarik zinciri ağ tasarımı problemi oluşturmak için modelde üretim tesislerinde yeni ürün

Tablo 8. Bağımsız ve Entegre Çözümlerin Karşılaştırılması

	Amaç Fonksiyonu	CPU Zamanı (sn)	Açılan Üretim Tesisleri	Açılan Geri Kazanım Tesisleri	Toplam Ek Kapasite Kullanımı
Kapalı Döngü Tedarik Zinciri Ağı	170.827	21,28	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
İleri Tedarik Zinciri Ağı	255.196	2,78	Fabrika, M1, M4	-	0
Tersine Tedarik Zinciri Ağı	91.114	1,86	-	Katı atık sahası, R5, R9, R10	0

üretilmesine izin verilmemiştir. Müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürün miktarları örnek senaryoda verildiği şekilde alınmıştır. Tersine tedarik zinciri ağı probleminde müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürünler geri kazanılarak yenilenmiş ürünler elde edilmekte ve müşteri taleplerini karşılamak üzere müşteri noktalarına iletilmektedir. Bu problem kapsamında hangi geri kazanım tesislerinin açılması gerektiğine, geri kazanım tesisleri ile müşteriler arasındaki ürün akışının nasıl olması gerektiğine, kullanılmış ürünlerden ne kadarının yenilenmesi ve ne kadarının bertaraf edilmesi gerektiğine karar verilmektedir.

İleri ve tersine yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı problemlerinin birbirinden bağımsız olarak çözülmesi ile elde edilen sonuçlar Tablo 8'de görülmektedir. Bu tablonun ilk satırında iki problemin entegre çözümü, yani kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı probleminin optimal çözümü sunulmaktadır.

Beklendiği üzere en fazla kâr, ileri yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı problemi tek başına çözüldüğünde elde edilmektedir. En az kâr ise tersine yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı probleminin çözümünden elde edilmiştir. Entegre çözüm ise neredeyse ileri ve tersine ağ problem çözümlerinin ortalamasına eşit bir amaç fonksiyonu değerine sahiptir. Ele alınan problemde ileri ve tersine ağı müşterileri aynı kişilerdir ve müşteri talepleri yeni yahut yenilenmiş üründen karşılanabilmektedir. Yenilenmiş ürün için özel bir ikinci el ürün pazarı bulunmamaktadır. Problem parametrelerine göre, müşteri taleplerinin yeni ve yenilenmiş üründen karşılanması arasında bir gelir farkı bulunmaktadır. Yenilenmiş bir ürünün satışından elde edilen gelir yeni bir ürünün satışından elde edilen gelirden daha düşüktür. Bu nedenle, entegre çözüm ile elde edilen kârın ileri yöndeki ağ tasarımı probleminin tek başına çözümünden daha az, tersine yöndeki ağ tasarımı probleminin çözümünden ise daha fazla olması beklenmektedir.

Her iki problemin birbirinden bağımsız olarak çözdürülmesi ile üretim ve geri kazanım tesislerinin farklı miktarlarda ve farklı yerlerde açılmasına ihtiyaç duyulduğu gözlemlenmektedir. Her iki problemin optimal çözümünde açılan tesislerin farklılık göstermesi problemin entegre olarak ele alınmasının kârı en bü-

yükleyecek tesislerin yerlerini belirlemek açısından çok daha mantıklı olduğunu göstermektedir.

Problemlerin optimal çözümü için gerekli çözüm zamanı incelendiğinde ise entegre çözümün bağımsız çözümlerden daha fazla zamana ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Daha kapsamlı bir problemin çözümü için daha fazla zamana ihtiyaç duyulması beklenen bir durumdur. Ancak, ele alınan problem bir stratejik planlama problemidir ve bu ağ tasarımı probleminin optimal çözümü için ihtiyaç duyulan sürelerin makul seviyede olduğu düşünülmektedir.

4. SONUÇ

Son yirmi yıldır yasal, ekonomik ve çevresel sebepler nedeniyle tersine lojistik ve kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı konularına olan ilgi artmıştır. Bu çalışmada, kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemi ele alınmış ve bu problemin çözümüne yönelik çok ürünlü, kapasiteli, deterministik bir karma tamsayı matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model örnek bir veri kümesi üzerinde optimal olarak çözülmüştür ve çeşitli parametre değerleri değiştirilerek duyarlılık analizleri yapılmıştır.

Modelin performansının test edilmesi amacıyla çok çeşitli duyarlılık analizi çalışmaları yapılmıştır. Yapılan bu analizler sonucu kapasite değerleri ile açılan toplam tesis sayısı ve amaç fonksiyonu değeri arasında ters orantılı bir ilişki bulunduğu görülmüştür. Ayrıca, ileri tedarik zinciri ağının kapasite değerlerindeki değişiminden daha az etkilendiği, tersine tedarik zinciri ağının ise kapasite değişimlerine karşı daha duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, geri kazanılması gereken minimum ürün oranı arttıkça elde edilen kârın azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi yenileme oranı arttıkça müşteri taleplerinin yenilenmiş ürünlerle karşılanması ve bunun sonucu olarak da yeni üründen elde edilene göre daha az kâr elde edilmesidir. Maliyet kalemleri içerisinde en büyük değere sahip olan sabit tesis açma maliyetinin sonuçlar üzerine olan etkilerine bakıldığında, geniş kapasiteli durumlarda tasarlanan ağın maliyet değişiminden etkilenmediği; ancak kapasitenin azaldığı durumlarda ağda değişiklikler olduğu gözlemlenmiştir. Sabit maliyet değerlerinin artışı ile beklendiği gibi, elde edilen kârın düştüğü

görülmektedir. Müşteri sayıları 50-250 değerleri arasında değiştirildiğinde, müşteri sayısının açılan üretim tesisi sayısını etkilemediği; ancak açılan geri kazanım tesisi sayısını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durumun başlıca sebebi müşterilerde oluşan tüm atıkların toplanmasının zorunlu olması ve yasal zorunluluklar sebebi ile bir minimum geri kazanım yüzdesinin bulunmasıdır. Tek ürünle çözdürülen modele beş ürüne kadar yeni ürünler eklenmiş ve ürün sayısının çözümler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ürün sayısının artması üretim tesisi ve geri kazanım tesisi sayısını artırmaktadır. Ürün sayısının müşteri sayısı değişimine göre ileri tedarik zinciri ağı tasarımını daha fazla etkilediği gözlemlenmiştir

Gelecekte, talep ve geri dönüş parametrelerinin belirsiz olduğu durumlara adapte olacak şekilde bir rassal programlama modeli geliştirilebilir. Ayrıca, tek periyotlu olan modelin çok periyotlu hale getirilmesi ve parametrelerin zaman içerisindeki değişimlerini de dikkate alan dinamik bir model geliştirilmesi de gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasında sayılabilir.

KAYNAKÇA

1. TC AB Bakanlığı. 2014. "Avrupa Birliği'nin Çevre Politikası," <http://www.ab.gov.tr/index.php?p=92&l=1>, son erişim tarihi: 03.06.2014.
2. **Amin, S. H., Zhang, G.** 2013. "A Multi-Objective Facility Location Model for Closed-Loop Supply Chain Network Under Uncertain Demand and Return," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, p. 4165–4176.
3. **Akcalı, E., Çetinkaya, S., Üster, H.** 2009. "Network Design for Reverse and Closed-Loop Supply Chains: An Annotated Bibliography of Models and Solution Approaches," *Networks*, vol. 53 (3), p. 231-248.
4. **Alumur, S. A., Kara, B. Y., Melo, T.** 2015. *Location and Logistics*, Editor: Laporte, G., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., ISBN-13: 978-3-319-13110-8, Springer, Berlin.
5. **Araújo, M. G., Magrini, A., Mahler, C. F., Bilitewski, B.** 2012. "A Model for Estimation of Potential Generation of Waste Electrical and Electronic Equipment in Brazil," *Waste Management*, vol. 32(2), p. 335-342.
6. European Commission. 2014. "Waste Electrical and Electronic Equipment," http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/legis_en.htm, son erişim tarihi: 03.06.2014.
7. **Eur-Lex.** 2011. "End-of-Life Vehicles," http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/l21225_en.htm, son erişim tarihi: 26.09.2011.
8. **Beamon, B. M., Fernandes, C.** 2004. "Supply-Chain Network Configuration for Product Recovery," *Production Planning & Control*, vol. 15 (3), p. 270–281.
9. **Demirel, N., Gökçen, H.** 2008. "A Mixed Integer Programming Model for Remanufacturing in Reverse Logistics Environment," *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, vol. 39, p. 1197–1206.
10. **Easwaran, G., Uster, H.** 2010. "A Closed-Loop Supply Chain Network Design Problem with Integrated Forward and Reverse Channel Decisions," *IIE Transactions*, vol. 42, p. 779–792.
11. **Fahimnia, B., Sarkis, J., Dehghanian, F., Banihashemi, N., Rahman, S.** 2013. "The Impact of Carbon Pricing on a Closed-Loop Supply Chain: An Australian Case Study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 59, p. 210-225.
12. **Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Wassenhove, L.** 2001. "The Impact of Product Recovery on Logistics Network Design," *Production Operations Management*, vol. 10, p. 156–173.
13. **Guide, V., Harrison, T.P., Wassenhove, L.** 2003. "The Challenge of Closed-Loop Supply Chains," *Interfaces*, vol. 33, p. 3–6.
14. **Jayaraman, V., Guide, V., Srivastav, R.** 1999. "A Closed-Loop Logistics Model for Remanufacturing," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 50, p. 497-508.
15. **Ko, H. J., Evans, G. W.** 2007. "A Genetic Algorithm-Based Heuristic for the Dynamic Integrated Forward/Reverse Logistics Network for 3PLs," *Computers & Operations Research*, vol. 34, p. 346–366.
16. **Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Wassenhove, L.** 2003. "Concurrent Product and Closed-Loop Supply Chain Design with an Application to Refrigerators," *International Journal of Production Research*, vol. 41 (16), p. 3689-3719.
17. **Kusumastuti, R. D., Piplani, R., Lim, G. H.** 2008. "Re-designing Closed-Loop Service Network at a Computer Manufacturer: A Case Study," *International Journal of Production Economics*, vol. 111, p. 244–260.
18. **Lee, D. H., Dong, M.** 2008. "A Heuristic Approach to Logistics Network Design for End-of-Lease Computer Products Recovery," *Transportation Research Part E*, vol. 44, p. 455–474.
19. **Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q.** 2009. "A Strategic and Tactical Model for Closed-Loop Supply Chains," *OR Spectrum*, vol. 31, p. 573-599.

20. **Listes, O.** 2007. "A Generic Stochastic Model for Supply-and-Return Network Design," *Computers & Operations Research*, vol. 34, p. 417–442.
21. **Lu, Z., Bostel, N.** 2007. "A Facility Location Model for Logistics Systems Including Reverse Flows: The Case of Remanufacturing Activities," *Computers & Operations Research*, vol. 34, p. 299–323.
22. **Lundin, J.F.** 2012. "Redesigning a Closed-Loop Supply Chain Exposed to Risks," *International Journal of Production Economics*, vol. 140, p. 596–603.
23. **Marin, A., Pelegrin, B.** 1998. "The Return Plant Location Problem: Modelling and Resolution," *European Journal of Operational Research*, vol. 104, p. 375-392.
24. **Min, H., Ko, H.J., Ko, C. S.** 2006. "A Genetic Algorithm Approach to Developing the Multi-Echelon Reverse Logistics Network for Product Returns," *International Journal of Management Science (OMEGA)*, vol. 34, p. 56-69.
25. **Özceylan, E., Paksoy, T., Bektas, T.** 2014. "Modeling and Optimizing the Integrated Problem of Closed-Loop Supply Chain Network Design and Disassembly Line Balancing," *Transportation Research Part E*, vol. 61, p. 142–164.
26. **Pishvaei, M. S., Torabi, S. A.** 2010. "A Possibilistic Programming Approach for Closed-Loop Supply Chain Network Design under Uncertainty," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 161, p. 2668–2683.
27. **Ramezani, M., Kimiagari, A. M., Karimi, B., Hejazi, T. H.** 2014. "Closed-Loop Supply Chain Network Design under a Fuzzy Environment," *Knowledge-Based Systems*, vol. 59, p. 108–120.
28. **Sahyouni, K., Savaskan, R. C., Daskin, M. S.** 2007. "A Facility Location Model for Bidirectional Flows," *Transportation Science*, vol. 41(4), p. 484–499.
29. **Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q.** 2006. "A Warehouse-Based Design Model for Reverse Logistics," *Journal of The Operational Research Society*, vol. 57, p. 615-629.
30. **Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q.** 2007. "An Optimization Model for the Design of a Capacitated Multi-Product Reverse Logistics Network with Uncertainty," *European Journal of Operational Research*, vol. 179, p. 1063-1077.
31. **Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q.** 2010. "Simultaneous Design and Planning of Supply Chains with Reverse Flows: A Generic Modelling Framework," *European Journal of Operations Research*, vol. 203, p. 336-349.
32. **Wang, H. F., Hsu, H. W.** 2010. "A Closed-Loop Logistic Model with a Spanning-Tree Based Genetic Algorithm," *Computers & Operations Research*, vol. 37, p. 376–389.
33. **Wang, Z., Yao, D. Q., Huang, P.** 2007. "A New Location-Inventory Policy with Reverse Logistics Applied to B2C e-Markets of China," *International Journal of Production Economics*, vol. 107, p. 350-363.
34. **Wei, J., Zhao, J.** 2013. "Reverse Channel Decisions for a Fuzzy Closed-Loop Supply Chain," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, p. 1502–1513.
35. **Wikipedia.** 2014. "Kyoto Protokolü," http://tr.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protokollü, son erişim tarihi: 03.05.2014.