

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYA (AEEE) GERİ  
DÖNÜŞÜMDE TOPLAMA VE DAĞITIM AĞLARININ  
TASARLANMASI VE YÖNETİMİ**

**DOKTORA TEZİ**

**LEYLA ÖZGÜR POLAT**

**DENİZLİ, ARALIK - 2020**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYA (AEEE) GERİ  
DÖNÜŞÜMDE TOPLAMA VE DAĞITIM AĞLARININ  
TASARLANMASI VE YÖNETİMİ**

**DOKTORA TEZİ**

**LEYLA ÖZGÜR POLAT**

**DENİZLİ, ARALIK - 2020**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

  
**LEYLA ÖZGÜR POLAT**

## ÖZET

### ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYA (AEEE) GERİ DÖNÜŞÜMDE TOPLAMA VE DAĞITIM AĞLARININ TASARLANMASI VE YÖNETİMİ

DOKTORA TEZİ

LEYLA ÖZGÜR POLAT

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. AŞKİNER GÜNGÖR)

DENİZLİ, ARALIK - 2020

Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya (AEEE) ile ilgili konular, sürdürülebilirlik çerçevesinde ekonomik, sosyal ve çevresel kaygılar nedeniyle son yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Aynı zamanda sosyal sorumluluk çerçevesinde kullanılmış ve/veya kullanım ömrü dolan elektronik ürünlerin yeniden üretim ve geri dönüşümü için yönetim süreçleri de dikkate alınması gereken önemli araştırma alanlarından. AEEE Kontrol Yönetmeliği süreçteki rolleri belirlemektedir. Yönetmelikte, "genişletilmiş üretici sorumluluğu" ilkesi ile özellikle üreticiler toplama, taşıma, geri dönüşüm ve bertaraf faaliyetlerini yürütmek ve ilgili maliyetleri üstlenmek için bir sistem kurmakla sorumludur. Bu nedenle, tersine ve kapalı döngü tedarik zinciri ağlarının, toplam maliyetleri en aza indirmede önemli bir rol oynayan yenileme kararları ile birlikte, belirlenen amaca göre en uygun şekilde tasarlanması ve yönetilmesi gerekir. Bu tez kapsamında, söz konusu ihtiyacın karşılanmasına katkıda bulunmak amacıyla, ağın toplam maliyetlerini en aza indirmek için bulanık karma tamsayılı doğrusal programlama ve karma tamsayılı programlama modelleri önerilmiştir. Ağın karar vericisi tek bir üretici veya üretici grubu ve/veya üçüncü parti firmalar tarafından oluşturulan bir yönetim organı olabileceği gibi farklı üretici, üretici grubu ve/veya üçüncü parti firmaların birleşerek kurdukları koordinasyon merkez/merkezleri olabilir. Önerilen modellerde, farklı hasar seviyelerindeki ürün dönüşleri ve yönetmelik gereklilikleri dikkate alınmış ve ilgili literatüre özgün katkı sağlanmıştır. Modellerin katkısı, CPLEX çözücüsü kullanılarak çözülen hipotetik vaka çalışmaları ile gösterilmiştir. Yönetmelik ve ağ tasarım parametrelerinin (minimum toplama oranları, üretici ve mağaza sayıları ve farklı üyelik değerleri gibi) amaç fonksiyonları üzerindeki etkileri değerlendirilerek senaryo analizleri geliştirilmiştir. Üretilen modeller ve senaryo analizleri, ilgili karar vericilere, sorumlu oldukları ağları daha etkili yönetmeleri için gerekli fırsatı ve esnekliği sunmaktadır ve böylece tez uygulama alanına da önemli katkılar sağlamaktadır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya, E-atık, Optimizasyon, Tersine Tedarik Zinciri Yönetimi, Kapalı Döngü Tedarik Zinciri Yönetimi

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND MANAGEMENT OF COLLECTION AND DISTRIBUTION NETWORKS IN WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT (WEEE) RECYCLING**

**PH.D THESIS**

**LEYLA ÖZGÜR POLAT**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
INDUSTRIAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:PROF. DR. AŞKINER GÜNGÖR)**

**DENİZLİ, DECEMBER 2020**

The issues related to Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) have generated an important research area in recent years due to economic, social and environmental concerns within the framework of sustainability. Within the framework of social responsibility, the management processes of the used and/or end-of-life electronic products to remanufacture and recycling is another important research area to be considered. The Regulation on the Control of WEEE determines the roles in the process. In the regulation, because of the "extended producer responsibility" principle, the manufacturers are specifically responsible for establishing a system to carry out the collection, transportation, recycling and disposal activities and handle the associated costs. Therefore, reverse and closed loop supply chain networks need to be designed and managed optimally according to specified objective including refurbishing decisions which play an important role to minimize total costs. In this thesis, in order to contribute to the fulfillment of this need, fuzzy mixed integer linear programming and mixed integer programming models are proposed to minimize total costs of the network. A single producer or producer group and/or a management organization formed by third party companies, or the coordination center/centers established by the different producer/producer group/third party companies may be the decision maker of the network. As a unique contribution to the related WEEE network design and management literature, product returns with different damage levels and regulatory requirements are taken into account in the proposed models. The value of the proposed models has been demonstrated through hypothetical case studies. The models were solved using CPLEX solver. Scenario analyzes were developed by evaluating the effects of regulation and network design parameters (such as minimum collection rates, number of manufacturers and stores, and different membership values) on objective functions. Developed models and related scenario analyses offer flexibility and perspective to related decision makers for managing their WEEE networks effectively. Therefore, this thesis has also potential contribution to the practice.

**KEYWORDS:** Waste Electrical and Electronic Equipment, E-waste, Optimization, Reverse Supply Chain Network Management, Closed-loop Supply Chain Network Management

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	3
1.2 Tezin Organizasyonu .....	4
<b>2. LİTERATÜR</b> .....	<b>6</b>
2.1 Ağ Tasarım Problemi .....	6
2.2 Literatür İncelemesi .....	10
<b>3. ATIK ELEKTRİKLİ ve ELEKTRONİK EŞYALARIN (AEEE) KONTROLÜ YÖNETMELİĞİ ve DURUM ANALİZİ</b> .....	<b>27</b>
3.1 Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği .....	27
3.2 Avrupa Birliği (AB) Ülkelerindeki ve Türkiye’deki Elektronik Atık Uygulamaları ve Durum Analizi .....	32
<b>4. ÜRÜN YENİLEME SÜREÇLERİNİ İÇEREN BULANIK TERSİNE TEDARİK ZİNCİRİ AĞ TASARIMI (MODEL 1)</b> .....	<b>40</b>
4.1 Modelleme Ortamı .....	40
4.2 Önerilen Matematiksel Model .....	42
4.3 Model Dönüşümü .....	48
4.4 Örnek Uygulama .....	52
4.5 Model Sonuçları ve Modelin Çalışma Alanına Katkısı.....	61
<b>5. ÜRÜN YENİLEME SÜREÇLERİNİ İÇEREN KAPALI DÖNGÜ TEDARİK ZİNCİRİ AĞ TASARIMI (MODEL 2)</b> .....	<b>63</b>
5.1 Modelleme Ortamı .....	63
5.2 Önerilen Matematiksel Model .....	66
5.3 Örnek Uygulama .....	73
5.4 Duyarlılık Analizleri.....	83
5.5 Model Sonuçları ve Modelin Çalışma Alanına Katkısı.....	92
<b>6. ÜRÜN YENİLEME SÜREÇLERİNİ İÇEREN PERİYODA DAYALI KOORDİNASYON MERKEZLİ BULANIK TERSİNE TEDARİK ZİNCİRİ AĞ TASARIMI (MODEL 3)</b> .....	<b>94</b>
6.1 Koordinasyon Merkezin Direktifteki ve Uygulamalardaki Rolü .....	94
6.2 Modelleme Ortamı .....	97
6.3 Önerilen Matematiksel Model .....	100
6.4 Model Dönüşümü .....	106
6.5 Örnek Uygulama .....	108
6.6 Model Sonuçları ve Modelin Çalışma Alanına Katkısı-Model 3.....	122
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>124</b>
<b>8. KAYNAKLAR</b> .....	<b>127</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>135</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: İleri tedarik zinciri ağı .....	7
Şekil 2.2: Tersine tedarik zinciri ağı .....	8
Şekil 2.3: Kapalı döngü tedarik zinciri ağı .....	9
Şekil 2.4: WEEE ve e-waste kelimeleri ile arama sonuçları (Scopus 2020) ....	10
Şekil 2.5: WEEE veya e-waste kelimeleri ile yıllara göre anahtar kelimedeki arama sonuçları (Scopus 2020) .....	11
Şekil 2.6: Reverse Supply Chain ve WEEE ile e-waste kelimeleri ile arama sonuçları (Scopus 2020) .....	11
Şekil 2.7: Closed-loop Supply Chain ve WEEE ile e-waste kelimeleri ile arama sonuçları (Scopus 2020) .....	11
Şekil 3.1: AB ve Türkiye'deki AEEE mevzuat tarihçesi (REC-Türkiye 2016) .....	28
Şekil 3.2: 2014-2021 yıllarında Dünyada gerçekleşen ve tahmini e-atık miktarı (Balde ve diğ. 2017) .....	34
Şekil 3.3: Belediye toplama merkezi – İsviçre (REC-Türkiye 2016).....	36
Şekil 3.4: Çorlu ve İzmit belediyeleri – Türkiye (REC-Türkiye 2016).....	36
Şekil 4.1: Tersine tedarik zinciri ağ tasarımı .....	41
Şekil 4.2: Örnek uygulamadaki bulanık tersine tedarik zinciri ağ tasarımı .....	53
Şekil 5.1: Kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı .....	64
Şekil 5.2: Örnek uygulamadaki kapalı döngü tedarik zinciri ağı .....	74
Şekil 5.3: Minimum toplama miktarlarına göre toplam maliyet ve kazanç değerleri (\$) .....	84
Şekil 5.4: Minimum toplama miktarlarına göre toplam ileri tedarik zinciri maliyet değerleri (\$) .....	85
Şekil 5.5: Minimum toplama miktarlarına göre toplam tersine tedarik zinciri maliyet değerleri (\$) .....	85
Şekil 5.6: Minimum toplama miktarlarına göre toplam çevresel maliyet değerleri (\$) .....	86
Şekil 5.7: Üreticilerin performans farklılıkları (\$) .....	88
Şekil 6.1: Koordinasyon merkezli tersine tedarik zinciri ağı.....	99
Şekil 6.2: Örnek uygulama-koordinasyon merkezli tersine tedarik zinciri ağı .....	108
Şekil 6.3: Üyelik değerlerine göre çözümler (x1000\$) .....	120

# TABLO LİSTESİ

## Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> E-atık için tersine tedarik zinciri ağ tasarımı literatür incelemesi özetini .....	23
<b>Tablo 2.2:</b> Tez kapsamında geliştirilen modellerin özellikleri.....	25
<b>Tablo 3. 1:</b> Yönetmeliğe göre toplama hedefleri (AEEKEY 2012).....	28
<b>Tablo 3.2:</b> Yönetmeliğe göre geri kazanım hedefleri (AEEKEY 2012).....	29
<b>Tablo 3.3:</b> Yönetmeliğe göre geri dönüşüm hedefleri (AEEKEY 2012).....	29
<b>Tablo 3.4:</b> 2014 ve 2017 Yıllarındaki Yönetmelik Kapsamındaki Nüfusun Yüzdesi (Balde ve diğ. 2017) (%).....	33
<b>Tablo 3.5:</b> 2017 Ocak itibari ile bazı Avrupa ülkeleri ve Türkiye'nin e-atık üretim ve uygulamadaki yönetmelik durumu (Balde ve diğ. 2017).....	34
<b>Tablo 3.6:</b> AB üye ülkelerdeki e-atıkların evlerden toplanmasındaki sorumluluklar (EC 2007).....	37
<b>Tablo 4.1:</b> Ürün gruplarına göre ürün satış bedeli ve ağırlık verileri.....	54
<b>Tablo 4.2:</b> Ürün gruplarına göre veriler .....	54
<b>Tablo 4.3:</b> $c$ mağazasına göre yenilenen ürün talep miktarları ve kapasiteleri	54
<b>Tablo 4.4:</b> $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü için ve toplama merkezlerindeki ürünlerin kalite yüzdesi ve geri kazanım merkezi $r$ 'deki verimlilik oranları.....	55
<b>Tablo 4.5:</b> $j$ hasar durumundaki $i$ ürününün $u$ yarı mamul/faydalı ve $h$ zararlı malzeme miktarları.....	56
<b>Tablo 4.6:</b> $u$ yarı mamul/faydalı malzemeler ile ilgili veriler (marjinal kazanç, satış fiyatı, talep, taşıma maliyeti,).....	57
<b>Tablo 4.7:</b> $h$ zararlı malzemeler ile ilgili veriler (bertaraf, taşıma maliyeti)....	57
<b>Tablo 4.8:</b> $r$ geri kazanım merkezi ile ilgili mesafe verileri.....	57
<b>Tablo 4.9:</b> $k$ toplama merkezindeki $i$ ürünleri için elinde bulundurma miktarları ve birim satın alış fiyatı .....	58
<b>Tablo 4.10:</b> $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü için mağaza satın alma maliyeti ve birim yenileme maliyetleri .....	58
<b>Tablo 4.11:</b> $r$ geri kazanım merkezindeki $i$ ürünleri için demontaj maliyeti, ürün yenileme kapasitesi ile minimum yenileme miktarı .....	59
<b>Tablo 4.12:</b> Performans ölçüleri.....	59
<b>Tablo 4.13:</b> Talep karşılanma yolları $WC_{cij}^{tr}$ .....	60
<b>Tablo 4.14:</b> Talep karşılanma yolları $WK_{cij}^{tr}$ .....	60
<b>Tablo 5.1:</b> Ürün gruplarına göre veriler .....	75
<b>Tablo 5.2:</b> $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü için mağaza satın alma maliyeti ve toplama merkezlerindeki ürünlerin kalite yüzdesi .....	75
<b>Tablo 5.3:</b> $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü için geri kazanım merkezi $r$ 'deki veriler (birim yenileme maliyetleri, verimlilik oranları).....	75
<b>Tablo 5.4:</b> $c$ mağazasına göre $i$ yeni/yenilenen ürün talep miktarları ve kapasiteleri .....	76
<b>Tablo 5.5:</b> $r$ geri kazanım merkezindeki $i$ ürünleri için demontaj maliyeti ve ürün yenileme kapasitesi ile minimum yenileme miktarı .....	76
<b>Tablo 5.6:</b> $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü için $u$ yarı mamul/faydalı ve $h$ zararlı malzeme miktarları.....	77



<b>Tablo 5.7:</b> $u$ yarı mamul/faydalı malzemeler ile ilgili veriler (marjinal kazanç, taşıma maliyeti, satış fiyatı, talep, çevresel etki katsayısı ve taşıyıcılara göre CO <sub>2</sub> emisyon ceza katsayıları).....	78
<b>Tablo 5.8:</b> $h$ zararlı malzemeler ile ilgili veriler (bertaraf, taşıma maliyeti, CO <sub>2</sub> emisyon ceza katsayıları) .....	78
<b>Tablo 5.9:</b> $d$ dağıtım merkezi ile ilgili veriler (depolama maliyeti, kapasite, mesafe) .....	78
<b>Tablo 5.10:</b> $r$ geri kazanım merkezi ile ilgili mesafe verileri.....	78
<b>Tablo 5.11:</b> $k$ toplama merkezindeki $i$ ürünleri için elinde bulundurma miktarları .....	79
<b>Tablo 5.12:</b> Ürün gruplarına göre taşıyıcılardaki kapasite ve CO <sub>2</sub> emisyon ceza katsayıları .....	79
<b>Tablo 5.13:</b> Performans ölçüleri(x1000\$) .....	80
<b>Tablo 5.14:</b> Üreticilerden talep karşılanma yolları $Q_{ci}^{tds}$ .....	81
<b>Tablo 5.15:</b> Mağazalardan talep karşılanma yolları $WC_{cij}^{tr}$ .....	82
<b>Tablo 5.16:</b> Toplama merkezlerinden talep karşılanma yolları $WK_{cij}^{tr}$ .....	82
<b>Tablo 5.17:</b> Yarı mamul/faydalı malzemelerin talep karşılanma yolları $XY_u^{tsr}$	83
<b>Tablo 5.18:</b> Minimum toplama hedeflerine göre karşılaştırmalı sonuçlar .....	84
<b>Tablo 5.19:</b> Koordinasyon merkezine bağlı üreticiler için performans ölçüleri (x1000\$).....	87
<b>Tablo 5.20:</b> Deney Setleri.....	89
<b>Tablo 5.21:</b> Deney setlerine göre karşılaştırmalı sonuçlar .....	90
<b>Tablo 5.22:</b> Kapasite arttırımı ile çözülen deneyler .....	92
<b>Tablo 6.1:</b> Ürün gruplarına göre yenilenen ürün satış bedelleri ve ağırlıklar .....	109
<b>Tablo 6.2:</b> Ürün gruplarına göre veriler .....	109
<b>Tablo 6.3:</b> Periyotlara göre yenilenen ürün talep ve mağaza kapasiteleri.....	110
<b>Tablo 6.4:</b> Periyotlara göre yarı mamul ve yararlı malzeme talep miktarları	111
<b>Tablo 6.5:</b> Toplama merkezlerindeki ürünlerin kalite yüzdesi ve geri kazanım merkezlerinin verimlilik oranları .....	112
<b>Tablo 6.6:</b> Yarı mamul ve yararlı malzemelere göre veriler .....	112
<b>Tablo 6.7:</b> Hasar durumlarına göre yarı mamul/yararlı malzeme ve zararlı malzeme miktarları.....	113
<b>Tablo 6.8:</b> Zararlı malzemelere göre veriler.....	113
<b>Tablo 6.9:</b> Geri kazanım merkezlerine göre mesafeler .....	114
<b>Tablo 6.10:</b> Toplama merkezindeki ürünler için elinde bulundurma miktarları ve birim satın alış fiyatları .....	114
<b>Tablo 6.11:</b> Mağazalardan toplanan ürünler için satın alma bedelleri ve geri kazanım merkezlerindeki birim yenileme maliyetleri.....	115
<b>Tablo 6.12:</b> Geri kazanım merkezlerine göre veriler .....	115
<b>Tablo 6.13:</b> Best bound search stratejisine göre performans ölçüleri .....	117
<b>Tablo 6.14:</b> Alternate best estimate search yöntemine göre performans ölçüleri (x1000).....	118
<b>Tablo 6.15:</b> Performans ölçüleri (x1000) .....	119
<b>Tablo 6.16:</b> $\mu = 1$ için talep karşılanma yolları $WC_{cijp}^{tr}$ .....	121
<b>Tablo 6.17:</b> $\mu = 1$ için talep karşılanma yolları $XY_{up}^{tsr}$ .....	122

## SEMBOL LİSTESİ

<b>AB</b>	:	Avrupa Birliği
<b>ABD</b>	:	Amerika Birleşik Devletleri
<b>AEEE</b>	:	Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya
<b>AEEKY</b>	:	Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya Kontrol Yönetmeliği
<b>ÇSB</b>	:	Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
<b>EEE</b>	:	Elektrikli ve Elektronik Eşya
<b>EPR</b>	:	Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu
<b>IJPR</b>	:	International Journal of Production Research
<b>LCA</b>	:	Life Cycle Assessment
<b>RoHS</b>	:	Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılması
<b>WEEE</b>	:	Waste Electrical and Electronic Equipment
<b>YK</b>	:	Yetkilendirilmiş Kuruluşlar

## ÖNSÖZ

Öncelikle doktora eğitimimdeki danışman hocam Prof. Dr. Aşkîner GÜNGÖR'e benim için harcadığı tüm zamanı, emeği ve sabrı için teşekkür ederim. Aynı zamanda tezim boyunca danışman hocam ile birlikte bana yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen tez izleme komitesi üyeleri Doç. Dr. Eren ÖZCEYLAN ile Doç. Dr. Özcan MUTLU'ya ve doktora tez savunmamda yer almayı kabul ettikleri ve sağladıkları katkılar için Doç. Dr. Mehmet Ali ILGIN ile Dr. Öğr. Üyesi Semih COŞKUN'a sonsuz teşekkür ederim.

Doktora ve tez süresince bana karşı sabrını ve desteğini her daim koruyan değerli daire başkanlarım Doç. Dr. Yusuf ÖZCAN ve emekli mühendis Şerife CİHANGİR, Dr. Abdulkadir YALDIR ve Prof. Dr. Abdullah Tahsin TOLA ile şube müdürlerim Hasibe AKGÜNDÜZ, Tefvik YILDIRIM ve İlker ULAŞ ile Neriman TOKÇALAR'a ve tüm Pamukkale Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı çalışma arkadaşlarıma, birlikte konferanslara katıldığım doktora sürecimde ve günlük yaşamdaki destekleriyle değerli dostlarım Doç. Dr. Can Berk KALAYCI ve Arş. Gör. Ece KALAYCI, ile dostlarıma da ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca doktora sürecine beraber başladığım ve ortak dersler alıp çalışmalar gerçekleştirdiğim Arş. Gör. Zeynep ÖZSÜT BOĞAR, Arş. Gör. Ozan ÇAPRAZ, Öğr. Gör. Dr. Ömer GÜLEÇ ve Öğr. Gör. Mehmet Ulaş KOYUNCUOĞLU'na teşekkür ederim.

Son olarak da yalnızca bu tezin yazımında değil, hayatımın her anında bana maddi ve manevi sınırsız destek veren, her çıkan zorluğu aşmamı sağlayan, sonsuz güven ve minnetime sahip babam Zekeriya ÖZGÜR, annem Hilmiye ÖZGÜR, ablam Sabriye DEMİRCİ, eniştem Erhan DEMİRCİ, kardeşim Ayşe ÖZGÜR ve kayınvalidem Türkan POLAT ve kayınpederim İbrahim POLAT'a tekrar tekrar teşekkür ederim.

En büyük teşekkürü hayatımdaki en büyük yere sahip olan ve günümü neşelendiren destekçilerim olan eşim Doç. Dr. Olcay POLAT'a ve tatlı minik kızım Duru POLAT'a sunmayı bir borç bilirim.

# 1. GİRİŞ

Teknolojideki ve dünyadaki hızlı değişimlerle birlikte tüketim ve kirlilik hızla artarken doğal kaynakların tükenmesi ve ekolojik dengenin bozulması söz konusudur. Özellikle elektronik ürünler, hayatı kolaylaştırması ve kolay ulaşımı ile günlük yaşamın her alanında vazgeçilemez bir konuma gelmiştir. Bu ürünler, bozulanlarının yanı sıra, moda etkisi ve hızlı değişim nedeni ile daha kullanım ömürlerini tamamlayamadan atık durumuna gelmektedirler. Sonuçta elektronik ürünlerin kullanım ömürleri kısalmakta ve elektronik atık (e-atık) miktarlarında önemli artış meydana gelmektedir. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği'ne göre büyük ev eşyaları, küçük ev aletleri, bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları, tüketici ekipmanları, aydınlatma ekipmanları, elektrikli ve elektronik aletler (büyük ve sabit sanayi aletleri hariç olmak üzere), oyuncaklar, eğlence ve spor ekipmanları, tıbbi cihazlar, izleme ve kontrol aletleri ve otomatların kullanım ömrü dolduğu andaki bütün bileşenleri, unsurları ve ihtiva ettiği sarf malzemeleri atık elektrikli ve elektronik eşya (AEEE) olarak tanımlanmaktadır (AEEKY 2012). Bu tanım son yıllardaki yabancı kaynaklarda çoğunlukla e-atık olarak da kullanılmaktadır. Elektronik atık, kullanım ömrü dolan ya da dolmadan yeni teknolojilerin üretilmesi ile eskiyen kullanılmayan elektrikli ya da elektronik ürünlerdir (Grünbergen ve Mark-Berglung 2003). E-atıklar çevreye ve insan sağlığına zararlı bileşenlerin yanı sıra bakır, gümüş, altın gibi değerli metaller ile plastik, cam gibi geri dönüştürülebilir malzemeleri de içermektedirler. Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı verilerine göre Amerika Birleşik Devletleri'ndeki (ABD) bir milyon dizüstü bilgisayarın geri dönüştürülmesi ile yılda 3 bin 657 evin kullandığı elektriğe eşdeğer enerji tasarrufu sağlanmakta ve e-atıkların sadece %12,5'i geri dönüştürülebilmektedir (EPA 2017). E-atık bertaraf etme oranları dikkate alındığında Amerika'da her yıl 60 milyon doları aşan altın ve / veya gümüş içeren telefon atılmış ve geri dönüşümlü her bir milyon cep telefonu için, yaklaşık olarak 15.980 kg bakır, 350 kg gümüş, 34 kg altın ve 15 kg. paladyum geri kazanılabilmektedir (EPA 2017). Küresel yeşil elektronik ürün değerlendirme aracı olan EPEAT için pazarlama müdürü Jonas Allen tarafından ABD'deki depolama alanlarındaki ağır metallerin % 40'ının atılan elektronikten geldiği tahmin edilmektedir. Allen'e göre eğer altın (% 15), gümüş (% 15) ve platin

(% 5) için geri dönüşüm oranları hepsi için % 100'e yükselirse, elektronik sektörü 12 milyar dolar finansal ve doğal sermaye yararı sağlayabilecektir (Button 2016). E-atık konusundaki tüm bu gerçekler dahilinde geri dönüşüm faaliyetlerinin etkinliği hem çevrenin korunması hem de kaynak israfının durdurulması adına önemli bir rol oynamaktadır. Dolayısı ile atıklardaki değerli bileşenlerin ve kullanılabilir parçaların yeniden üretim ağına dahil edilmesi ve kullanılmayacak durumda olan atıkların da uygun koşullar altında bertaraf edilerek ürün yaşam döngüsünün çevreye en az zarar ile tamamlanması gerekmektedir. Atıkların geri kazanımında farklı yöntemler olmakla birlikte özellikle demonte olarak geri kullanımına olanak sağlanan elektronik atıkların çevreye olan zararlarını azaltmak için geri dönüşüm sürecinin etkinliği sürdürülebilir bir çevre için önemlidir.

Elektronik atıkların sınıflandırılarak toplanması ve yeniden üretime ve ekonomiye kazandırılması son yıllarda oldukça önemli konular arasında yer almaktadır. Bu işlemlerdeki en büyük sorumluluk "Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya (AEEE) (AEEKY 2012; EU 2012) Kontrolü Yönetmeliği'ne göre üreticilere düşmektedir. "Genişletilmiş üretici sorumluluğu" ilkesi çerçevesinde üreticiler AEEE'lerin toplanması, nakliyesi, işlenmesi ve bertaraf maliyetlerini üstlenmekle sorumlu olup, bu süreci yürütecek sistemi kurmakla da sorumlu tutulmuşlardır (REC-Türkiye 2016). Üreticiler, aynı yönetmelikte üstlenmekle sorumlu oldukları maliyetleri muhasebede ayrı bir satırda göstermek kaydıyla yeni ürün satış faturasına AEEE'lerin idari ve yönetim maliyetlerini geçmeyecek şekilde yansıtabilmektedirler. Ayrıca, üreticilerin yönetmelikte belirtilen yükümlülükleri daha etkili ve etkileşimli yerine getirebilmek için kâr amacı gütmeyen ortak bir koordinasyon merkezi kurmaları da zorunluluktur. Dolayısı ile üreticilerin, kirleten öder mantığı çerçevesinde üzerlerine yüklenen maliyetleri ve üretim maliyetlerini minimize edecek en etkin ürünün tüketiciye gönderimi olarak bilinen ileri tedarik ağları ile ürünün müşteriden üreticiye doğru hareketi olarak tanımlanan tersine tedarik ağlarını yeniden tasarlamaları gerekmektedir. Bu açıdan üreticilerin gelirlerini arttıracak şekilde e-atıklardaki faydalı bileşenleri ayrıştırarak (demontaj) satışı ve yenileme faaliyetleri ile atık olmayan ürünleri yeniden sisteme dahil etmeleri de bir gerekliliktir. Demontaj işleminde, daha değerli olan parça ve alt montajların önce sökülmesi, üretimi veya tedariki durdurulmuş parça ve alt montajların ani taleplere karşı önce sökülmesi, kimyasal madde içeren zararlı parçaların önce sökülmesi, kimyasal ıslah için geri kalan

ürünün saflığını artırmak, stokta bekletilecek parça ve alt montajın çıkarılması, bertaraf edilecek malzeme miktarını azaltmak, çevreye duyarlı üretim standartlarına ulaşmak gibi durumlar amaçlanır (Gungor ve Gupta 2001). Yenileme faaliyetleri, geri dönen ürünlerin test edilmesi, muayene ve tamir etme işlemleri sonrasında fonksiyonel açıdan çalışır duruma getirilmesi olarak ifade edilmektedir. Yenileme işlemleri politik açıdan gereksiz atık oluşumunu engellediğinden çevre dostu olma stratejisini, firma açısından hasarlı ürün kayıplarını engellediğinden zarar önleme stratejisini ve müşteri açısından da ürün ve fiyat çeşitliliği sağlanması ile maliyet indirimini desteklemektedir (Yoo ve Kim 2016). Apple gibi bazı elektronik üreticileri ürün toplama ve yenileme faaliyetlerini üretim sistemlerine entegre ederek pazarda “Apple sertifikalı yenilenen ürünler” adı ile yenilenen ürün satışında sektöre liderlik etmektedirler. Üreticiler, toplanan ürünlerdeki kalite, miktar ve tür artışı nedeni ile ters akış zincirindeki süreçleri etkili bir şekilde yürütmek zorundadırlar. Sonuç olarak yönetmelikte yer alan hem üretici sorumluluğu hem de kurulması zorunlu olan koordinasyon merkezlerinin e-atıkların geri kazanım süreçlerindeki rolleri ile birlikte süreç etkinliğini sağlayan kapalı ve tersine tedarik zinciri ağı tasarlanarak kurulması ve yönetilmesi gerekmektedir. Sunulan tezin başlıca amacı da bu gerekliliğe katkı sağlamaktır.

## **1.1 Tezin Amacı**

İlgili literatür incelendiğinde e-atıklarda tersine tedarik zinciri ve kapalı döngü tedarik zinciri aktivitelerinin benimsenmesi ile ürün geri dönüş yönetiminin etkileri üzerine çok az çalışma yer almaktadır ve çalışmaların önemli bir bölümünün daha çok kullanılmış ürünlerin müşterilerin geri alınmasına yönelik problemlere odaklı olduğu görülmektedir (Shaharudin ve diğ. 2017). Toplanan ürünlerin geri dönüşüm süreçlerinin yönetimi ve sürdürülebilirliğin temel bileşenleri olan çevresel, ekonomik ve sosyal unsurların bu süreçlere entegrasyonuna yönelik bütünsel modelleme yaklaşımlarına yönelik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Sunulan tez ile e-atık potansiyeline yönelik tahminlerin varlığı ve toplama merkezlerinin bulunduğu varsayımı ile AEEKEY (2012)’de yer alan üretici sorumluluğu ve minimum geri kazanım hedefleri dikkate alınarak yönetmeliğe uyum ile birlikte gerçek hayatta ele alınması gereken e-atıkların toplanması, ayrıştırılması, işleme

tesislerindeki süreçler sonrasında yeniden kullanılarak oluşan ürün, hammaddelerin veya zararlı malzemelerin dağıtım süreçlerini çevre etkileri ile birlikte değerlendiren modellerin bir ağ yapısı içerisinde matematiksel modelleme yaklaşımı ile oluşturulması amaçlanmaktadır.

Tez kapsamında tersine ve kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı ve yönetimi üç farklı model ile ele alınmıştır. Belirli varsayımlar altında e-atıkların toplanması, ayrıştırılması, demontaj ve yenileme faaliyetleri sonrasında yeniden kullanılarak oluşan ürün veya hammaddelerin dağıtım süreçleri ile zararlı malzemelerin bertarafı ve taşınmasını birlikte değerlendiren karma tam sayılı programlama ve bulanık karma tam sayılı modelleri önerilmiştir. Tasarlanan bulanık tersine tedarik zinciri ve kapalı döngü tedarik zinciri ağ modelleri, çok aşamalı lojistik problemlerinin, Sırt Çantası problemindeki çoklu seçim portföyünün ve kaynak dağıtımının benzerliği ile NP açısından zor bir konu olarak kabul edilebilir (Che ve diğ. 2014) ; bununla birlikte, tezde ele alınan özellikle tersine tedarik zinciri modelleri daha karmaşık bir yapıdadır ve hasar durumu oranları, farklı periyotlar, AEEE direktifindeki minimum hedeflerin yanı sıra bulanık parametreler de dikkate alınmıştır. Modellerin çözümünde bazı değişkenlerin tamsayı bazı değişkenlerin ise kesirli değerler alabildiği karma tamsayı programlama yöntemi ve bulanık modeller için parametrelerin bulanık olduğu durumlarda beklenen aralıkların karşılaştırılması yolu ile bulanık sayıların sıralama yöntemleri kullanılmıştır. Modeller ILOG CPLEX 12.7.1 çözücüsü kullanılarak çözüm elde edilmiştir.

## **1.2 Tezin Organizasyonu**

Tezin ikinci bölümünde ağ tasarım problemi, e-atık ve kapalı döngü/tersine tedarik zinciri ile ürün yenileme süreçleri hakkında literatür taraması yer almaktadır. Bölüm 3'de e-atık yönetmeliği ile ilgili bilgiler ve Avrupa Birliği üye ülkelerle Türkiye'deki yönetmelik, uygulamalar ve durum analizi incelenmiştir. Dördüncü bölümde ürün yenileme süreçlerini içeren bulanık tersine tedarik zinciri ağ tasarımının model yapısı, matematiksel modeli, model dönüşümü, örnek uygulama ve sonuçlar gösterilmektedir. Beşinci bölümde ürün yenileme süreçlerini içeren kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımının model yapısı, matematiksel modeli, örnek uygulama ve

sonuçlar ile duyarlılık analizleri yer almaktadır. Bölüm 6’da koordinasyon merkezinin yönetmelik ve uygulamalardaki rolünün açıklanmasının ardından ürün yenileme süreçlerini içeren koordinasyon merkezli bulanık tersine tedarik zinciri ağının model yapısı, matematiksel modeli, model dönüşümü, örnek uygulama ve çözümleri yer almaktadır. Bölüm 7’de tezin sonuç ve öneriler bölümü açıklanmaktadır. Son bölümde ise kaynaklar ardından da öz geçmiş bilgileri yer almaktadır.



## 2. LİTERATÜR

Bu bölümde ilk önce tezin temel konusu olan ağ tasarım konusunda temel bilgiler sunulduktan sonra ilgili literatür analizi detaylı olarak sunulmuş ve tezin alana katkısı belirginleştirilmiştir.

### 2.1 Ağ Tasarım Problemi

Tedarik zinciri yönetimi faaliyetleri, insanların yerleşik hayata geçmeden önce avlanılan ya da toplanılan yiyeceklerin taşınması, depolanması ve yerlerinin değiştirilmesi ile başlar ve orta çağda malların çeşitliliği, nakliye ve depolama faaliyetlerinin ülkeler arası ticaret nedeni ile daha fazla önem kazanmıştır. Gelişmelerin devam etmesi ile 1980'lerde lojistik yönetimi kavramı ortaya çıkmıştır. 1990'lı yıllarda tedarik ve lojistik fonksiyonları birlikte değerlendirilmiş ve günümüz entegre tedarik zinciri yönetiminin temelleri atılmıştır (Güleş ve diğ. 2012).

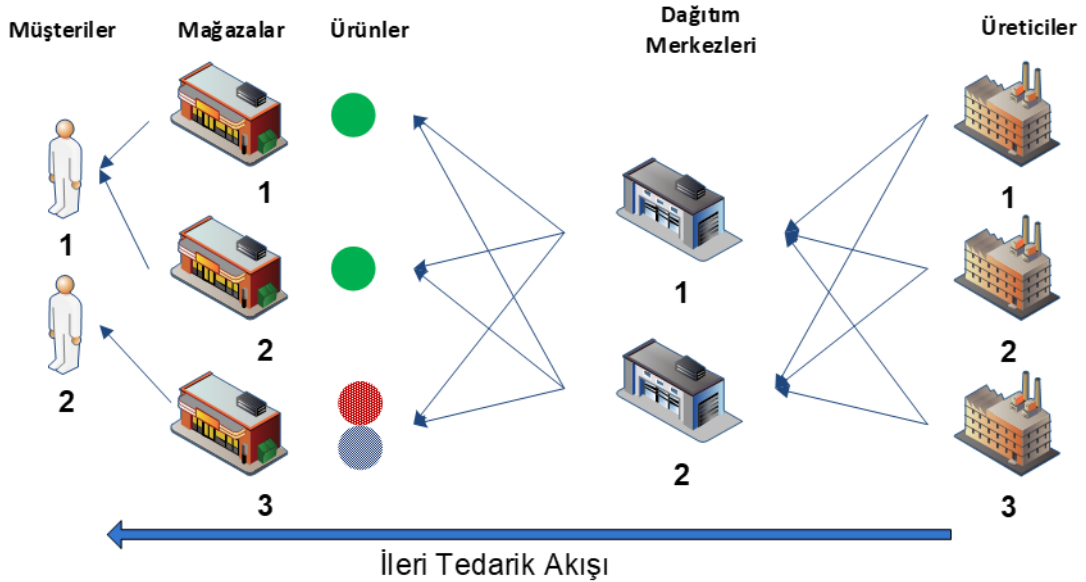
Tedarik zincirindeki karar problemleri, yerleşim, kapasite ve teknoloji seçimi gibi stratejik karar problemleri ile ürün atama, tedarikçilerin değerlendirilmesi ve seçimi ile ürün taşıma ağlarının belirlenmesi gibi taktik seviyedeki problemleri içermektedir (Benitez ve diğ. 2013). Tedarik zinciri tasarım problemi, taktik düzeydeki genel problem türlerinden biridir ve eşzamanlı çoklu problem çözmeyi öngörür. Genel olarak, tedarik zinciri ağı tasarım problemi, bir dağıtım ağındaki müşterilerin taleplerini karşılamak için transfer sistemini, tedarikçileri ve depoları içerir. Ortak amaç, talebi, depoyu, tesis kapasitesini aşmadan ve sıcaklık ve süre gibi sektöre özgü kısıtlamaları karşılayan en düşük maliyetli sisteme karar vermektir.

Tedarik zinciri ağı tasarımı, probleme özgü modelin ve hedeflerinin belirlenmesini gerektirir. Problem çerçevesinin net olarak tanımlanması ve hangi karar vericinin problemi çözmesi gerektiğinin belirlenmesi önemlidir. Dolayısıyla, ağ tasarımında, ağ karar vericileri kilit noktalardır (Coskun ve diğ. 2016). Bu nedenle yönetmelikte genişletilmiş üretici sorumluluğu gereği ağın, karar verici olarak üreticilere göre tasarlanması gerekliliği açıktır. Hedeflere, stratejik ve taktik kararların uygulanması ile ulaşılır. Buna göre kararlar, maliyet en küçüklenmesi, müşteri memnuniyeti, çevresel fayda, gelir veya kar maksimizasyonu, konumların veya

tesislerin sayı ve kapasitelerinin belirlenmesi gibi tek veya çoklu hedefleri aramaktadır (Liao 2018). Bir sonraki aşamada gerçek hayattaki durumu yansıtmak için belirlenen amaç veya hedefler dahilinde model kısıtlarının, karar değişkenlerinin tanımlanması ve varsayımlar dahilinde analitik olarak formüle edilmesi gerekir. Model kısıtları, genellikle kapasite (nakliye, üretim, depolama vb.), müşteri beklentileri (kalite, teslimat süresi vb.) gibi genel kısıtlamalar, talep ve toplama miktarları, geri dönüşüm oranı, CO<sub>2</sub> emisyonu veya çevresel etkiler gibi talebe ve modele özgü kısıtlardır. Karar değişkenleri; tesis yeri, tesis sayısı, ağın yapısı, süreçlerin çizelgeleme veya taşıma rotası, stok seviyesi, ürünlerin fiyatları, istihdam vb. kararlardan oluşur.

Modelde problemlere ve hedeflere göre ileri, tersine veya kapalı döngü tedarik zinciri ağının tasarlanmasına karar verilmelidir.

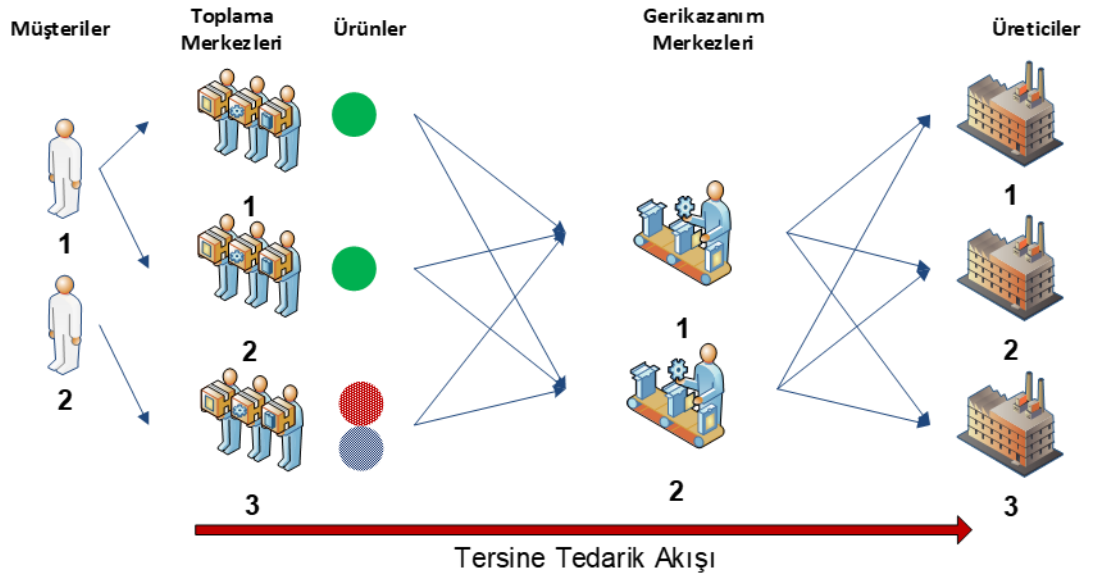
İleri tedarik zinciri ağı tasarımında, üreticilerden müşterilere doğrudan bir akış vardır. Üretim kapasitesini aşmadan üretim ve ürün teslimi ile müşteri talebinin karşılanması ile ağın maliyet minimizasyonu hedeflenmektedir. Üreticileri, dağıtım merkezlerini, ürünleri, mağazaları ve müşterileri içeren ileri tedarik zinciri ağı Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1: İleri tedarik zinciri ağı

Tersine lojistik, 1980'li yıllarda ürünün tüketiciye gönderimi olarak bilinen ileri yönlü lojistiğin tersine, ürünün müşteriden üreticiye doğru hareketi şeklinde

tanımlanmıştır (Rogers ve Tibben-Lembke 2001). Dowlatshahi (2000) ise tersine lojistiği, “üreticinin daha önce yolladığı ürün veya parçaları, olası geri dönüşüm, yeniden üretim veya bertaraf amacıyla sistematik bir şekilde tüketim noktasından geri kabul etmesidir” şeklinde açıklamaktadır. Yani tersine lojistikteki tüm işlemlerin etkinliği için tedarik zincirinin yeniden tasarlanması da gerekmektedir. Sonuç olarak tersine tedarik zinciri toplama, kontrol, sıralama, sökme, yeniden işleme / geri dönüşüm ve bertaraf etme işlemleri ile bu ters faaliyetler arasındaki akışlara ilişkindir. Tersine tedarik zincirinde, “ Hangi kanallar ile kullanılmış ve / veya kullanım ömrü dolan ürün toplanacak”, “Ne kadar kullanılmış ve / veya kullanım ömrü dolan ürün toplanacak” ve “Hangi kullanılmış ve / veya kullanım ömrü dolan ürün tipi ve kalitesi toplanacak” soruları dikkat edilmesi gereken en önemli konulardır (Chen ve diğ. (2018), Shahaudin ve diğ. (2017)). Geri kazanım merkezleri, ürünler, toplama merkezleri ve müşterilerden oluşan tersine tedarik zinciri ağı Şekil 2.2’de gösterilmektedir.

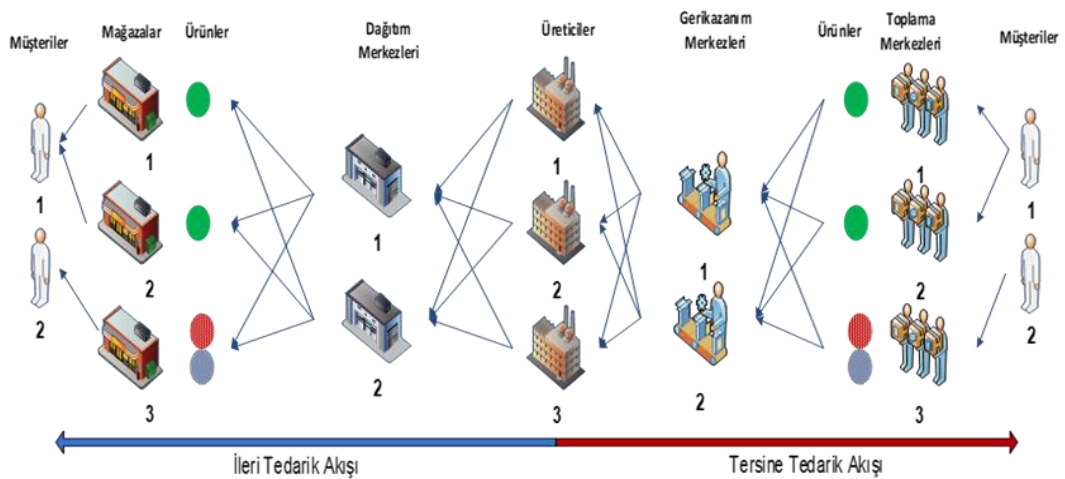


Şekil 2.2: Tersine tedarik zinciri ağı

İleri tedarik zinciri, ürün talebi, standart ürün paketleme ve yapısı, geleneksel pazarlama teknikleri ve hız ile ilgilidir. Öte yandan, tersine tedarik zinciri, pazarlamayı zorlaştıran ürün geri dönüşleri, değişken paketleme ve değiştirilmiş ürün yapısı ile ilgilidir. İleri tedarik zinciri ile karşılaştırıldığında, tersine tedarik zinciri daha çevre odaklı, yönetimi zor, tasarımı karmaşık ve önemli düzeyde belirsizlik içerir.

Tersine tedarik zinciri, ileri tedarik zincirinin deterministik yapısının aksine daha stokastik bir yapıdadır.

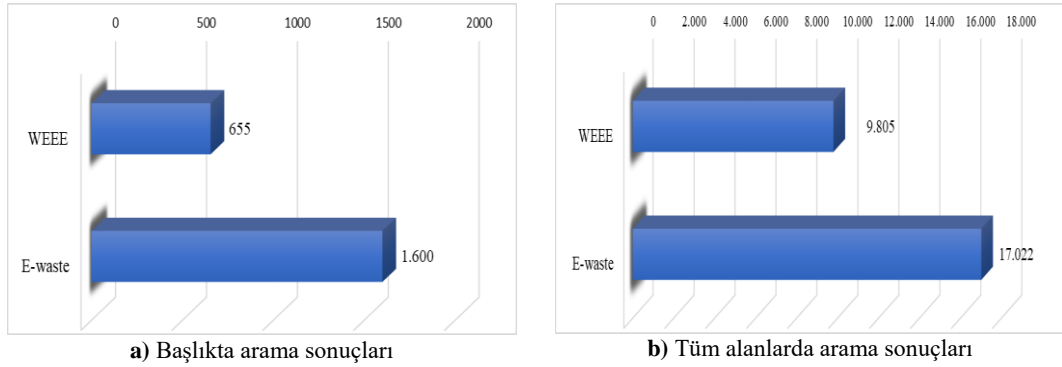
Ürünlerin etkin bir şekilde yönetimi ve geri kazanımda kapalı döngü tedarik zinciri önemli bir rol oynamaktadır. Kapalı döngü tedarik zinciri, tedarik zincirindeki ileri ve tersine aktiviteleri tek bir sistemde ele almaktadır. Hammaddeler, kapalı tedarik zinciri ağında müşteri taleplerini karşılayacak şekilde üreticiler tarafından yeni ürünler olarak teslim edilmektedir. Müşteriye teslim edilen ürünler, kullanım ömrünün dolması veya arızalanması gibi nedenlerle üreticiye kullanılmış ürün olarak iade edilir. Üreticiler, iade edilen ürünleri yönetmeliklerde belirtilen gereksinimleri karşılayacak şekilde geri kazandırır veya imha ederler. Bu nedenle, tersine ve kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı, ters faaliyetlere, ağ kanallarına, ürün türüne, kalitesine, miktarına ve probleme özgü diğer faktörlere bağlı olarak hangi tesislerin (toplama merkezleri, yeniden üretim merkezleri, demontaj merkezleri vb.) ağda olacağı; hangi geri dönüşüm işlemlerinin (yenileme, onarım, demontaj, yeniden üretim vb.) uygulanacağı; toplanan ürünlerin ne kadarının geri kazanılacağı (tahmin); geri dönüştürülmüş ürün veya parçalar için pazar planının belirlenmesi gibi tüm seviyelerde benzer kararları içerir (Das ve Chowdhury 2012). Şekil 2.3’de kapalı döngü tedarik zincirine örnek bir ağ yapısı yer almaktadır.



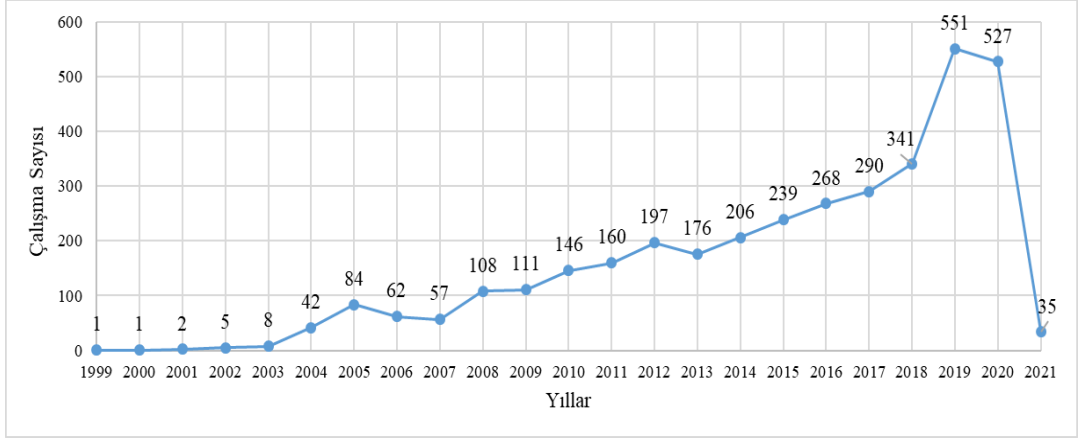
Şekil 2.3: Kapalı döngü tedarik zinciri ağı

## 2.2 Literatür İncelemesi

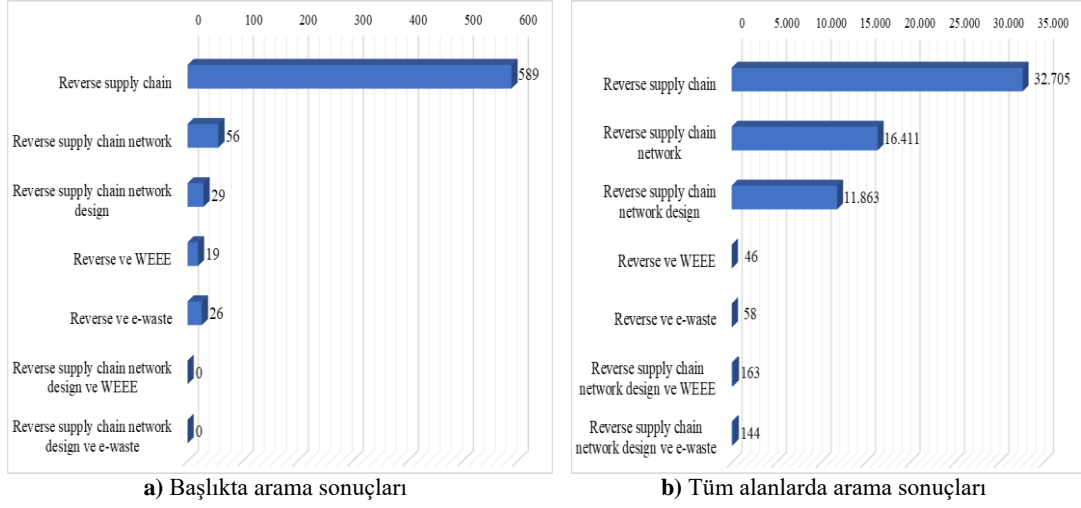
Literatürdeki çalışmalar incelenirken aramalarda “WEEE”, “waste electrical and electronic equipment”, “AAEE”, “atık elektrikli ve elektronik eşya”, “e-waste”, “elektronik atık”, “reverse supply chain”, “tersine tedarik zinciri”, “reverse supply chain network design”, “tersine tedarik zinciri ağ tasarımı”, “closed loop supply chain”, “kapalı döngü tedarik zinciri”, “closed loop supply chain network design”, “kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı” kelimeleri ve bu kelimelerin kombinasyonları kullanılmıştır. Literatürdeki aramalar, başlıkta ve herhangi bir yerde bu arama kelimelerini içeren çalışmalar şeklinde gruplanmıştır. Scopus veritabanında gerçekleştirilen arama işlemlerinden bazıları Şekil 2.4, Şekil 2.5, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de yer almaktadır. Şekil 2.4’de sırası ile “WEEE” ve “e-waste” kelimeleri ile yapılan başlıkta ve tüm alanlarda yapılan arama sonuçları yer almaktadır. Şekil 2.5’de “WEEE” veya “e-waste” kelimeleri kullanılarak anahtar kelimelerde yıllara göre arama sonuçları yer almaktadır. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de ise “reverse” veya “closed loop supply chain” ile “WEEE” veya “e-waste” kelimelerinin arama kombinasyonları yer almaktadır.



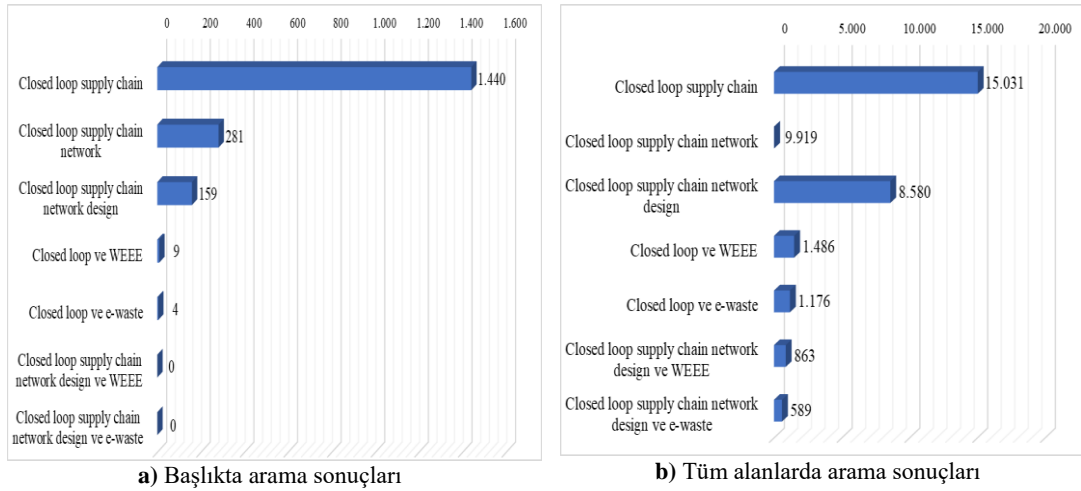
Şekil 2.4: WEEE ve e-waste kelimeleri ile arama sonuçları (Scopus 2020)



**Şekil 2.5:** WEEE veya e-waste kelimeleri ile yıllara göre anahtar kelime arama sonuçları (Scopus 2020)



**Şekil 2.6:** Reverse Supply Chain ve WEEE ile e-waste kelimeleri ile arama sonuçları (Scopus 2020)



**Şekil 2.7:** Closed-loop Supply Chain ve WEEE ile e-waste kelimeleri ile arama sonuçları (Scopus 2020)

Arama sonuçları incelendiğinde Şekil 2.4’de WEEE ve e-waste kelimelerini içeren çalışmaların çalışma alanı olarak önemli bir yere sahip olduğu çok sayıda çalışmanın varlığı görülmektedir. Şekil 2.5’de anahtar kelimelerde aramalar incelendiğinde “WEEE” veya “e-waste” kelimeleri içeren 3,617 çalışmanın 1999 yılından başlayarak 2021 yılına kadarki dağılımları yer almaktadır. Şekilden de anlaşılacağı gibi bu alandaki çalışmaların son yıllarda arttığı ve özellikle 2019 ve 2020 yıllarında tüm çalışmaların %29,80’ninin gerçekleştirildiği görülmektedir.

Şekil 2.6 ve Şekil 2.7 incelendiğinde ise “WEEE” ve “e-waste” kelimeleriyle birlikte “reverse” ve “closed-loop supply chain network design” şeklinde aramanın sınırlandırılması ile çalışma sayısının da azaldığı görülmektedir. Özellikle başlıkta aramalarda “WEEE” ve “e-waste” için “reverse” veya “closed-loop supply chain network design” kelimelerini birlikte içeren çalışmanın yer almadığı göze çarpmaktadır. Literatürde tezin konusuna odaklı çalışmaların daha kapsamlı analiz edilerek çalışmanın alana katkısının belirginleştirilmesi amacıyla bu bölümde sunulan literatür incelemesi literatürde tezle ilgili olan çalışmalarla sınırlı tutulmuştur. Bu nedenle, bu bölümde e-atık çalışmalarına yönelik genel literatür incelemesine yer verilmemiştir. Çalışmalar ve e-atık için tersine ve kapalı döngü tedarik zinciri ile ürün yenileme işlemlerini inceleyen çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmalar, genellikle kronolojik olarak yıllara göre gruplanarak ele alınmış ve özellikle bu alandaki literatür taraması çalışmalarına öncelik verilmiştir. Aynı zamanda literatür incelemesinde çoğunlukla Şekil 2.6’da da görüldüğü gibi çalışmaların %51,89’unun gerçekleştirilmiş olduğu son on yıldaki daha güncel çalışmalar dikkate alınmıştır.

E-atık ile ilgili çalışmaları incelediğimizde Pérez-Belis ve diğ. (2015) elektronik atıklar ile ilgili yaptıkları literatür araştırmasında; çalışmaların e-atık yönetimi, e-atık üretimi e-atık karakterleri (materyal ve içerikleri, sınıflama ve tahmin), e-atıkların sosyal yönleri, yeniden kullanım ve yeniden kullanıma hazırlanmaları, ürünlerin kullanım ömürlerini uzatma yöntemleri, geri dönüşümün iyileştirilmesi için tasarım ve metodolojiler ile e-atıkların ekonomik yönleri hakkında olduğunu söylemektedirler. Ayrıca literatürde e-atıklardan metallerin metalürjik kurtarma yöntemlerinin incelendiği (Cui ve Zhang 2008), e-atık konusuna (tanımı, e-atık tahmin yöntemleri ve içerikleri) genel bir bakışın ardından e-atık yönetiminde mevzuatlar ve girişimlerle ilgili dünya üzerindeki uygulamaların incelendiği (Widmer

ve diğ. 2005), e-atıkların fiziksel, kimyasal ve çevresel etki değerlendirmelerinin incelendiği (Robinson 2009), e-atıklardaki toksik maddelerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkileri ile e-atık yönetim stratejilerinin incelendiği (Kiddee ve diğ. 2013) literatür tarama çalışmaları da mevcuttur.

En güncel literatür incelemesi çalışmaları ise De Souza Melaré ve diğ. (2017), Chatterjee ve Abraham (2017), Tansel (2017) ve Huisman ve diğ. (2019) tarafından gerçekleştirilmiştir. De Souza Melaré ve diğ. (2017), 2010-2013 yılları arasındaki katı atık yönetimde bilgi ve iletişim teknolojileri ve yöneylem araştırması kullanarak uygulanan karar destek sistemleri hakkında literatür taraması yapmışlardır. Buna göre 87 yayın içerisinde en fazla ele alınan konu katı atık geri dönüşümü ve e-atık yönetimi (%21,8) ile tahmin ve planlama yöntemleri (%20,7) olarak bulunmuştur. Yazarlar, çalışmaları yöneylem araştırması yöntemleri olarak değerlendirildiğinde en fazla matematiksel optimizasyon modellemenin kullanıldığı, ardından sırası ile çok kriterli karar verme yöntemleri, sezgisel yöntemler, stokastik yöntemler, ağ teorisi ile istatistiksel yöntemlerin geldiği gözlenmiştir. Chatterjee ve Abraham (2017) literatür taraması çalışmalarında dünyadaki e-atık durumu yönetimi ve geri kazanımı çalışmalarını incelemişlerdir. Çalışmalarında e-atıklar ve içerdiği bileşiklerin çevredeki etkileri ile tehlikeli metallerin bertarafı hakkında bilgileri sunulmuştur. Tansel (2017) e-atık yönetimindeki zorlukları inceleyerek, sürdürülebilirlik ve küresel çevre kalitesi materyalleri açısından kontrollü mekanizmalar ile altyapı geliştirme ihtiyacını vurgulamıştır. Çalışmada e-atık miktarlarındaki artışlar, ileri teknoloji ürün imalatında artan malzeme talebi, e-atık bileşenleri için geri dönüşüm zorlukları ve bunun sonucunda e-atıkların küresel sınırlar arası çapraz taşınmasının önemi ve zorluğu anlatılmaktadır. Huisman ve diğ. (2019) başlangıç ülkelerdeki, gelişmekte olan, ve gelişmiş ülkelerdeki e-atık için “Politika ve Mevzuat”, “İşletme ve Finans” ve “Teknolojiler ve Beceriler” ana başlıkları altında genel bir bakış açısıyla durum incelemesi yapmışlardır.

E-atık ile ilgili özellikle tersine tedarik zinciri ağ tasarımı problemi üzerine gerçekleştirilen çalışmaları incelediğimizde, ilk çalışmalardan biri olan Krikke ve diğ. (1999) kullanılmış ürünlerin işlenme şeklini belirlemeyi ve karma tamsayılı doğrusal programlama modelini kullanarak toplam maliyetlerini en aza indirmeyi amaçlamışlardır ve modeli, Hollanda'daki Venlo'da gerçek bir fotokopi endüstrisi için



uygulamışlardır. Srivastava (2008), e-atıklar için çok ürünlü çok aşamalı karma tamsayılı doğrusal programlama modelini tersine lojistik ağı tasarımı için gerçekleştirmiştir. Neto ve diğ. (2009) e-atıklar için tersine lojistik ağında maliyet minimizasyonu, atık minimizasyonu, kullanılan enerji minimizasyonu amaçlarını iki aşamalı sezgisel yöntem ile çözmüşlerdir. Achilles ve diğ. (2010) elektronik ürünlerin tersine tedarik zinciri ağını optimize etmek adına mevcut toplama noktaları ile geri dönüşüm tesislerinin altyapılarını dikkate alarak karma tamsayılı doğrusal programlama modelini Yunanistan'ın Orta Makedonya Bölgesi için gerçek bir örnek üzerinden değerlendirmişlerdir. Gomes ve diğ. (2011) toplama ve geri dönüşüm merkezleri için en iyi konumların aynı anda seçildiği ve yönetmelikteki geri dönüşüm oranı ile kişi başına (3kg) yıllık toplama miktarı hedeflerini dikkate alarak genel bir MILP modeli önermişlerdir. Alumur ve diğ. (2012) çok dönemli tersine lojistik ağ tasarımı sorunları için matematiksel bir programlama yaklaşımı ile kar maksimizasyonunu amaçlamışlardır. Modelde, modüler kapasiteler, tesislerin kapasite artırımı, ürün içerikleri (BOM), tesislerde minimum verim, değişken işletme maliyetleri, ikincil piyasadaki sınırlı talepleri dikkate almışlardır. Dat ve diğ. (2012) toplanan ürün çeşitlerine göre hangi geri dönüşüm işleminden geçtiği bilgisi ile toplam maliyet minimizasyonu için tersine tedarik zinciri ağı için karma tam sayılı doğrusal modelleme yaklaşımı geliştirmişlerdir. Shokouhyar ve Aalirezai (2017) İran'da e-atık tersine tedarik zinciri ağ tasarımında kar maksimizasyonu, çevresel etki minimizasyonu ve sosyal fayda (işçilik, işçi sağlığı, yerel gelişim) maksimizasyonu amaçları için çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama modelini geliştirerek çok amaçlı genetik algoritma ve dominant olmayan sıralama genetik algoritması ile çözmüşlerdir. Ayrıca çok amaçlı genetik algoritma ile toplama merkezi ve geri dönüşüm tesisi yerlerini belirlemişlerdir. Xu ve diğ. (2017) iki ülke arasındaki e-atık toplama, ayrıştırma ve dönüşüm merkezlerinin nerelerde açılması gerektiği hangi tipte olmaları gerektiği ile ilgili karar verirken farklı belirsizlik oranlarında ve farklı uluslararası karbon salınım değerlerine göre maliyet minimizasyonunu amaçlarlar. Karar vericilere farklı belirsizlik ve CO<sub>2</sub> salınım miktarlarına göre global tersine tedarik zincirinin tasarımının nasıl olması gerektiğine dair bilgi vermektedirler. Sadece hammadde ile ilgilenmekte olup döviz kuru farklılığını da incelemişlerdir. John, Sridharan ve Kumar (2018) çok ürünlü çok aşamalı tersine lojistik sistem tasarımını, mobil telefon ve dijital kameralar için tamsayılı doğrusal programlama yaklaşımı ile kar maksimizasyonu, farklı tesislerin sayısı ve yerinin belirlenmesi amacı ile

gerçekleştirmişlerdir. Geri kazanım faaliyetlerinden yeniden üretim, tamir ve geri dönüşüm ile ilgilenmişlerdir. Geri dönen ürünleri düşük ve yüksek hurda değeri olarak değerlendirmişlerdir. Düşük kalite hurda değerli dönen ürünler geri dönüşüm ve tamirde, yüksek kalite hurda değerine sahip ürünler ise yeniden üretimde kullanılmaktadır. Literatürdeki çoğu çalışmada geri dönen ürün kaliteleri üzerine yeterli çalışmanın olmaması ve eksik kalmasından dolayı bu açığı kapatmak adına ürünleri sınıflandırdığı iddiasında bulunmaktadırlar. Duyarlılık analizini toplanan ürünlerin içerisindeki yüksek hurda değeri yüzde farklılıklarına göre gerçekleştirmiş ve yüksek hurda değerli ürünlerden daha fazla olduğunda kar artmıştır.

John, Sridharan, Kumar, ve diğ. (2018) buzdolabı için farklı ürün toplama miktarlarına göre kar maksimizasyonu amacı ile malzeme listesini de dikkate alarak karma tam sayılı doğrusal programlama modelini oluşturmuşlardır. Yüksek ve düşük kalan yararlı ömür şeklinde toplanan ürünleri sınıflayarak yüksek değerli olanların yeniden üretime düşük değerli olanların ise demontaja gönderilmesi şeklinde kalite değerini de sistemlerinde kullanmışlardır. Doan ve diğ. (2019b) çok ürünlü çok aşamalı tersine tedarik zincirini e-atıklar için riskleri ve bulanıklığı dikkate alarak bulanık karma tamsayı programlama modelini geliştirmişlerdir. Bulanık parametrelerde üçgensel bulanık sayıları dikkate almışlardır. Modeli Vietnam'daki bir elektronik firması için uygulamışlardır. Messmann ve diğ. (2019) orijinal parça üreticileri gözü ile bu üreticilerin büyüklüklerinin tersine tedarik zinciri ağına etkilerini ekonomik ve çevresel amaç fonksiyonları ile karma tam sayılı modelini Avrupa geri dönüşüm ağı için oluşturmuşlardır. Çevresel 21 parametreyi yaşam döngüsü etki değerlendirme yöntemi ile çevresel etki değerlendirmelerini gerçekleştirmişlerdir.

E-atık ve kapalı döngü/tersine tedarik zincirini ve ürün yenileme ile ilgili son dönemde yapılan çalışmaları incelediğimizde, Yoo ve Kim (2016) çalışmalarında kapalı döngü tedarik zincirinde yeni ve yenilenen ürünlerin fiyatlandırma kararlarını içeren birinci ve ikinci el pazarlarındaki karmaşık yapının incelenmesini amaçlamaktadır. Çalışmada, üretici, satıcı ve yenileme merkezini içeren üç aşamalı tedarik zincirinde satış, üretim ve yenileme işlemlerini gerçekleştirenlere göre 5 senaryo üzerinden yeni ve yenilenen ürünlerin fiyatları ve tedarik zincirinin kar fonksiyonuna etkilerini incelemişlerdir. Buna göre yeni ve yenilenen ürünlerdeki en uygun fiyat ve en iyi kar

sonucu satış, üretim ve yenileme işlemlerinin üretici tarafından gerçekleştiği durum sonucuna varmışlardır. Chen ve diğ. (2018) çalışmalarında ürün yenileme sürecini, belirsizliği ve stokları dikkate alarak çok periyotlu olarak toplam maliyet minimizasyonunu amaçlayan kapalı döngü tedarik zincirini doğrusal olmayan tamsayı programlama ile optimize etmeyi amaçlamaktadırlar. Dikkate aldıkları maliyetler, demontaj, yenileme, stok, yenileme için parça bulundurmama maliyetleridir. Çalışmalarında belirsizliği, kalite değeri ile yenilenen ürün talep miktarı ve müşterilerden kullanılmış ürünün tedarikinde (adet ve kalite) kullanmışlardır. Adet ve kalite değerlerini MATLAB'taki simülasyon üzerinden hesaplayarak modeli çözmüşlerdir. Çalışmaları ile firmalara geri dönen ürün kalitesi ve stok seviyesi hakkında karar desteği sağlamışlardır. Çalışmada yeni ürün satışı dikkate alınmamış, sadece toplanan ürünlerin yenileme sonrasında satışı incelenmiştir. Shaharudin ve diğ. (2017) kapalı döngü tedarik zinciri aktivitelerinde ürün dönüşlerinin etkilerini Malezya'daki ISO 14001 sertifikalı 150 firma üzerinden deneysel bir anket ve farklı yöntemler ile incelemişlerdir. Çalışmalarında, geri toplanan ürün kapsamının (miktar, geri dönüş zamanı, tipi ve kalite gibi) kapalı döngü tedarik zinciri aktivitelerini etkilediği ve kapalı döngü tedarik zinciri aktivitelerinin de tersine tedarik zincirini pozitif yönde etkilediği sonucuna ulaşmışlardır. Jafari ve diğ. (2017) geri dönüştürülen malzemeler ile üretilen ürünler için fiyatlandırma ve talep kararlarını 1 üretici, 1 toplayıcı ve 1 dönüştürücü tesis olmak üzere üç aşamalı iki kanallı tedarik zinciri üzerinden oyun teorisi ile incelemişlerdir. Literatürdeki çalışmalardan farkı ilk kez geri dönüşüm sürecini iki kanal üzerinden incelemiştir. Buna göre ele alınan problemdeki incelenen durum 1 geri dönüşecek ürünün toplayıcıdan alınarak üretici tarafından dönüştürülmesi, durum 2 ise üreticinin geri dönüştürülmüş malzemeleri almasıdır. Toplama işlemi ile geri dönüşüm süreci tek bir karar verici tarafından yürütülür ise ve toplanan ürünün geridönüştürülebilirlik derecesinin fazla olması üreticinin karının arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Çalışma, belli derecedeki geri dönüştürülmemiş ürünün toplayıcılardan alınıp üreticinin kendisi tarafından geri dönüştürmesi kararını desteklemektedir.

Nowakowski (2017) konteynır yükleme problemi ve kapasiteli araç rotalama problemini e-atık toplama, depolama ve transfer süreçleri için ele almışlardır. Konteynırdaki taşınan adet miktarı maksimizasyonu ile taşıma maliyeti minimizasyonunu amaçlamışlardır. Sonuçları, Polonya'daki toplama şirketleri için

gerçek hayattaki durumlar üzerinden irdelemişlerdir. Dai ve Li (2017) kapalı döngü tedarik zinciri ağı türlerinden yeniden kullanım (palet, karton gibi paketleme malzemeleri), yeniden üretim ve tamiri dikkate almıştır. Çalışmalarında, iki amaç fonksiyonlu bulanık karma tam sayılı programlama ile dinamik kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Amaç fonksiyonları, kazanç maksimizasyonu ve üretilen atık minimizasyonunu hedeflemektedir. Literatürden farkı dinamik tesis yer seçimini gerçekleştirmişlerdir. Xu ve diğ. (2017) iki ülke arasındaki e-atık toplama, ayrıştırma ve dönüşüm merkezlerinin nerelerde açılması gerektiği hangi tipte olmaları gerektiği ile ilgili karar verirken farklı belirsizlik oranlarında ve farklı uluslararası karbon salınım değerlerine göre maliyet minimizasyonunu amaçlamışlardır. Çalışmalarında karar vericilere farklı belirsizlik ve CO<sub>2</sub> salınım miktarlarına göre global tersine tedarik zincirinin tasarımının nasıl olması gerektiğine dair bilgi vermektedirler. Sadece hammadde ile ilgilenmekte olup döviz kuru farklılığını da incelemişlerdir. Ma ve Li (2018) zararlı ürünler için risk kontrol kısıtı ve ödül ceza mekanizmasını aynı anda kullanarak kapalı döngü tedarik zinciri tasarlamışlardır. Belirsiz talep ve geri dönüşlerle iki aşamalı stokastik programlama modeli senaryo bazlı olarak oluşturulmuş ve genetik algoritma ve paralel sayım metodu ile çözüm sağlanmıştır. Farklı kabul edilebilir maksimum risk değeri ile ödül-ceza katsayılarına göre duyarlılık analizi yapılmıştır. John, Sridharan ve Kumar (2018) çok ürünlü çok aşamalı tersine lojistik sistem tasarımını, mobil telefon ve dijital kameralar için tamsayı doğrusal programlama yaklaşımı ile kar maksimizasyonu, farklı tesislerin sayısı ve yerinin belirlenmesi amacı ile gerçekleştirmişlerdir. Geri kazanım faaliyetlerinden yeniden üretim, tamir ve geri dönüşüm ile ilgilenmişlerdir. Geri dönen ürünleri düşük ve yüksek hurda değeri olarak değerlendirmişlerdir. Düşük kalite hurda değerli dönen ürünler geri dönüşüm ve tamirde, yüksek kalite hurda değerine sahip ürünler ise yeniden üretimde kullanılmaktadır. Literatürdeki çoğu çalışmada geri dönen ürün kaliteleri üzerine yeterli çalışmanın olmaması nedeni ile ürünleri sınıflandırmışlardır. Duyarlılık analizini toplanan ürünlerin içerisindeki yüksek hurda değeri yüzde farklılıklarına göre gerçekleştirmiş ve yüksek hurda değerli ürünlerden daha fazla olduğunda kar artmıştır. Liao (2018), Taiwan'daki geri dönüştürülebilir yığın mobilya atıkları için çok aşamalı tersine lojistik modelini karma tamsayı doğrusal olmayan programlama ile modellemiştir. Toplam kar maksimizasyonu için tamir, yeniden üretim, geri dönüşüm, yeniden kullanım veya bertaraf etme işlemlerini ele almıştır. Hibrit genetik algoritma ile üretim, tamir, geri

dönüşüm, yeniden kullanım ve toplama merkezlerinin nerede ve ne kadar sayıda açılıp açılmayacağı ile toplanan ürünlerin teslim edilip edilmeyeceğine karar vermiştir. Gerçek veriler ile mevcut durumu ve önerilen durumu karşılaştırarak önerilen durum ile iyileştirmeler elde etmiştir. Model, talep değişimleri ve bölgesel toplama merkezlerinin kapasite değişimlerine göre test edilmiştir. Hasanov ve diğ. (2019) çalışmalarında çoklu alıcı, katman 1 ve katman 2 tedarikçi ve bir üreticiden oluşan dört seviyeli kapalı çevrim tedarik zincirinde yeniden üretimde sipariş miktarlarının koordinasyonu üzerine çalışmışlardır. Ters akışta muayene, demontaj merkezi ve yeniden üretim merkezi yer almaktadır. Talepler, yeni üretim ve müşterilerden toplanan ürünlerin yeniden üretilmesi ile karşılanmaktadır. Toplam maliyeti azaltma amacı ile iki karma tamsayılı doğrusal olmayan matematiksel model geliştirmişlerdir. Sonuç olarak sadece üretim veya sadece yeniden üretim yerine iki stratejinin birleştirilmesi ile optimal sonuca ulaşıldığını ve hazırlık maliyetlerinin bu iki stratejide etkili olduğunu bulmuşlardır. Ahmadi ve Amin (2019) cep telefonları için farklı tipteki ürün geri dönüşlerini dikkate alan kapalı döngü tedarik zinciri ağını karma tam sayılı modelleme ile tasarlarken tedarikçi seçimini de gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca talep ve geri dönüşleri bulanık olarak ele almışlardır. Messmann ve diğ. (2019) orijinal parça üreticileri gözü ile bu üreticilerin büyüklüklerinin tersine tedarik zinciri ağına etkilerini ekonomik ve çevresel amaç fonksiyonları ile karma tam sayılı modelini Avrupa geri dönüşüm ağı için oluşturmuşlardır. Çevresel 21 parametreyi yaşam döngüsü etki değerlendirme yöntemi ile çevresel etki değerlendirmelerini gerçekleştirmişlerdir. Samuel ve diğ. (2020) kapalı döngü tedarik zinciri ağında toplanan ürün kalitelerinin etkilerini karbon paylaşımı ile birlikte inceleyen deterministik matematiksel model önerisi sunmuşlardır.

Türkiye'deki kapalı döngü tedarik zinciri ve yönetmelik uyumunu dikkate alan çalışmalarda literatürde yer almaktadır. Kilic ve diğ. (2015) Türkiye'de üretilecek e-atık miktarlarını 10 farklı senaryoda inceleyerek e-atıkların minimum geri dönüşüm oranları üzerinden maliyet minimizasyonu amacını karışık tam sayılı doğrusal programlama ile tersine lojistik ağ tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Dikkate aldıkları maliyetler, taşıma, elleçleme, işleme, yeni geri dönüşüm tesisi ve depolar için sabit maliyet, nihai işlem ve imha maliyetleridir. Özceylan ve diğ. (2017), ömrünü tamamlamış araçların geri dönüşümünde kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımını Türkiye'deki bir firma için gerçekleştirmişlerdir. Doğrusal programlama modelinde

toplam maliyetin minimizasyonu ile gelir maksimizasyonunu amaçlanmıştır. Amaç fonksiyonunda; yeni araçların üretim ve taşıma maliyeti, ömrünü dolduran araçların ve bileşenlerinin taşıma maliyeti ile toplama, ayırma (sökme), parçalama, geri dönüşüm ve imha etme (yakma, gömme gibi) maliyetlerinin yanı sıra yeniden kullanılan veya yeniden imal edilen parça satışı, hurda metal satış gelirleri yer almaktadır.

Kapalı döngü tedarik zinciri ve tersine lojistik ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında daha fazla bilgi için literatür taraması çalışmalarının incelenmesinin gerekliliği ve literatürdeki boşlukların daha hızlı bir şekilde görünebileceği bir gerçektir. Buna göre bu alanlardaki literatür taraması çalışmaları incelendiğinde, Akçalı ve diğ. (2009) çalışmalarında tersine ve kapalı çevrim ağ tasarımı çalışmalarındaki modelleri ve çözüm yaklaşımlarını ele almışlardır. Bu konuda, Jayant ve diğ. (2012), Huscroft ve diğ. (2013), Govindan ve diğ. (2015) , Govindan ve Soleimani (2017), Diallo ve diğ. (2017), Kazemi ve diğ. (2018) , Islam ve Huda (2018), Doan ve diğ. (2019a), Andrade ve diğ. (2019) ve Van Engeland ve diğ. (2020)'de literatür taraması çalışmaları sunmuşlardır. Jayant ve diğ. (2012) içerik analizi yöntemini kullanarak tersine lojistik ve kapalı döngü tedarik zincirleri üzerine 1990-2009 yıllarındaki 120 çalışmayı, kullanılan modelleme yöntemi ve varsayımlar bazında incelemiştir. Yazarlar çalışmaları, tersine lojistik ağ tasarımı, kapalı döngü tedarik zincirlerinde yeniden üretim, tersine lojistikte stok kontrolü ve tersine tedarik zinciri olarak incelemiş ve en çok çalışmanın tersine lojistik ağ tasarımı alanında olduğunu bulmuşlardır. Seuring ve Müller (2008), sürdürülebilir tedarik zincirleri üzerine literatür incelemesi yapmıştır. Govindan ve diğ. (2015), 2007-2013 yılları arasındaki 382 çalışmayı içerik analizi yöntemi ile tersine lojistik ve kapalı döngü tedarik zincirleri alanında incelemişlerdir. Yazarlar çalışmaları, problem tipine, araştırma ve çözüm yöntemine göre sınıflandırmışlar ve çalışmaların yaklaşık %70'inin doğrusal karma tamsayılı model kullanılarak çözüldüğünü belirlemişlerdir. Govindan ve Soleimani (2017) Journal of Cleaner Production dergisinde 2014 yılının sonlarına kadar kabul edilip online yayınlanan 83 çalışmayı tersine lojistik ve kapalı döngü tedarik zincirleri alanında incelemişlerdir. Sonuç olarak yazarlara fırsat tanıyabilecek alanları; kapalı döngü tedarik zinciri ve matematiksel modeller, ürün tasarımı, operasyonel ve taktiksel seviyedeki karar değişkenlerinin kullanımı ile

operasyonel risk yönetimi, dışkaynak, müşteri servisi, rekabet, tüketici memnuniyeti ve yönetsel uygulamalarda servis sağlama süreci olarak belirtmişlerdir.

Diallo ve diğ. (2017) yeniden üretilen ikinci el ürünlere odaklanarak kapalı döngü tedarik zincirindeki kalite, güvenilirlik ve bakım konuları ile ilgili literatür taraması gerçekleştirmişlerdir. 1985 yılından sonraki 104 çalışmayı kalite modelleri, güvenilirlik, bakım, yeniden üretim, garanti modelleri ile risk ve güvenlik modelleri başlıkları altında incelemişlerdir. Yeniden üretim başlığındaki çalışmalarını da genel yeniden üretim, demontaj, iyileştirme, yenileme ve yeniden kullanım alt başlıkları altında incelemişlerdir. Çalışmalarında, ürün yenileme çalışmalarında bakım politikalarının nasıl olması gerektiği gibi alanların ilgi çekici olabileceği sonucuna varmışlardır. Kazemi ve diğ. (2018) literatür taraması çalışmalarında 2000 ile Temmuz 2017 yılları arasında IJPR dergisinde tersine lojistik ve kapalı döngü tedarik zinciri yönetimi konularında yayınlanan 94 çalışmayı bibliometrik ve içerik analiz yöntemlerine göre incelemişlerdir. Çalışmaları matematiksel ve matematiksel olmayan çalışmalar şeklinde iki ana grupta ele almış ve %80 oranında matematiksel modellerin yayımlandığını görmüşlerdir. Matematiksel modelleri de kendi arasında stok ve ürün geri dönüş yönetimi (%28), ağ tasarımı (%23), dinamik modeller (%10), tedarik zinciri koordinasyonu (%7) ve diğerleri (%12) şeklinde alt başlıkta ele almışlardır. Gelecek çalışmalar için boşluk bulunan çalışma alanları olarak; gerçek senaryolarla analiz, sektöre özgü çalışma, bulanıklığın modellenmesi, insan faktörünün ele alınması, çevresel yönlerin ele alınması (Tedarikçi gelişimi, araç rotalama ve atama, ağ tasarımı, kırbaç etkisi, ürün geri dönüş yönetimi, kanal (mağaza, üretici vb..) koordinasyonu, yeniden kullanılabilirlik, geridönüştürülebilirlik, ürün kalite yönetimi) ile yönetmelik ve müşteri farkındalığı ile sosyal çevre ve yönetim risklerinin ele alınabileceğini söylemektedirler.

Islam ve Huda (2018) ise 1999 ve Mayıs 2017 yılları arasında e-atıklar için tersine lojistik ve kapalı döngü tedarik zinciri alanlarındaki 157 çalışmayı içerik analizi yöntemine göre incelemişlerdir. Çalışmaları tersine dağıtımda tasarım ve planlama, karar verme ve performans değerlendirme, kavramsal çerçeve ve nitel çalışmalar olarak ele almışlardır. İncelemelerine göre en fazla çalışma tersine dağıtımda tasarım ve planlama (%55) grubunda olup, bu grupta açık çevrim ağ tasarımı (51 adet), kapalı döngü ağ tasarımı (16 adet), 3. parti tersine lojistik sağlayıcı seçimi (11 adet) ve araç

rotalama (9 adet) çalışmalarını dikkate almışlardır. Sonuç olarak kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı, geri dönüşüm ile ilgilenen kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımında tersine lojistikte mali etkinlik, çevresel maliyet ve çevresel etkileri içeren amaç fonksiyonunun ele alınması, ağ tasarımında e-atık üretimi, geri dönüşüm, yeniden üretim, yeniden kullanım ve tamir işlemlerinin entegre edilmesi, gerçek senaryoların kullanılması, bulanık değişkenlerin kullanılması, tersine lojistikte simülasyon tabanlı toplama süreçlerinin ele alınması, sosyal, ekonomik ve çevresel boyutların birlikte ele alınması, küçük ve büyük firmaların ortaklığı, araç rotalamada taşıma ve toplamada CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılması, ürün odaklı e-atık tersine lojistik ağ tasarımı, yaşam döngüsü değerlendirme ve malzeme akışı analizlerinin kullanılması gelecekte çalışabilecek hala boşluk bulunan çalışma alanlarıdır. Doan ve diğ. (2019a), e-atık ile ilgili tersine tedarik zinciri literatürünü 1999-2019 yılları arasında dört ana başlık altında incelemişlerdir. Bu başlıklar uygulama faktörleri, performans değerlendirme ve karar verme, toplanan e-atıkların tahmini ve ağ tasarımı şeklindedir. En fazla çalışma %33 ile ağ tasarımı çalışmaları iken ağ tasarımı çalışmaları ile ilgili gelecekte çalışabilecek alanları şu şekilde belirlemişlerdir. E-atık ile ilgili tersine tedarik zinciri ağ tasarımında risk faktörlerinin sisteme entegre edilmesi, ağ tasarımında bulanık yaklaşımın geliştirilmesi, e-atıkların toplanmasında farklı kaynakların (evlerden, endüstriyel firmalardan ve kamu sektöründen) aynı anda sisteme dahil ederek çözülebilmesi, partner seçiminin sisteme entegre edilmesi, ürün odaklı ve sezgisel yaklaşımların ele alınması şeklindedir. Aynı zamanda çalışmanın sonucu olarak genişletilmiş üretici sorumluluğunun ancak toplama sürecinin etkin olarak izlenmesi ve paydaşların açık bir şekilde tanımlanarak sisteme entegre edilmesi ile uzun vadede iyi bir şekilde uygulanabileceğini ve bu durumun çalışılmasının gelecek çalışmalar adına oldukça ilginç bir konu olacağını belirtmektedirler. Andrade ve diğ. (2019), 1998-2018 yılları arasında e-atık çalışmaları ile ilgili tarihsel ve son yıllardaki araştırmaların eğilimlerini değerlendirmek için bibliyometrik analiz ile literatür taraması gerçekleştirmişlerdir. Analizde birkaç yıldır e-atık akış analizi, geri dönüşüm, değerli metallerin geri kazanımı ve geri dönüşüm alanlarının risk değerlendirmesi ile çalışmaların yoğunlukta olduğunu bulmuşlardır. Gelecek çalışma konuları olarak her yıl kıtlığı ve talebi nedeni ile kritik metallerin (örn. In, Ga, Pd ve nadir toprak elementleri) ayrıştırılması, ömrü kısa olan ve önemli bir değerli malzeme kaynağı olan elektronik cihazlar (ör. cep telefonları, tabletler ve dizüstü bilgisayarlar), e-atıklardaki, özellikle bu tür politikaları uygulamayan gelişmekte olan ülkelerde



toksik unsurları kısıtlayan direktiflerin oluşturulması ve şu anda WEEE için kapsamlı referans örnekleri bulunmadığından, sertifikalı referans materyalleri (CRM'ler) belirtmektedirler.

Van Engeland ve diğ. (2020) ters lojistik ve atık yönetimi üzerine bütünlük bir bakış açısı ile 207 atık türü için tersine tedarik zinciri çalışmaları hakkında literatür incelemesi gerçekleştirmişlerdir. Literatür incelemesi kapsamını kombinatoriyal optimizasyon modelleri ile stratejik ağ tasarımı ile sınırlandırmışlardır. Çalışmalarında atık yönetimi ve tersine lojistikteki modelleme çalışmalarında talep ve ürün dönüşlerinin stokastik doğası ve belirsizliğin, çok amaçlı modellerin çalışabileceğini, çevresel, sosyal ve performans göstergeleri modellemenin yapılabileceği, farklı paydaş (devlet, kamu atık kuruluşları ve özel şirketler vb.) hedeflerinin göz önüne alınabileceği ile tüm bu durumların (belirsizlik, çok ürünlü, çok amaçlı, ölçek ekonomisi, farklı paydaş vb.) daha kompleks modellerle sezgisellerin geliştirilerek çözüm sağlanmasının gelecek çalışmalarda yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Tüm bu literatür çalışmaları incelendiğinde tersine ve kapalı döngü tedarik zinciri aktivitelerinin benimsenmesi ile ürün geri dönüş yönetiminin etkileri üzerine daha kapsamlı ve gerçeğe uyumlu modellere yönelik ihtiyacın varlığı görülmektedir. Bu nedenle e-atık için kapalı döngü tedarik zincirinde de yer alan tersine tedarik zinciri ağ tasarımı ile ilgili çalışmaların özeti Tablo 2.1'de yer almaktadır

**Tablo 2.1:** E-atık için tersine tedarik zinciri ağ tasarımı literatür incelemesi özeti

Çalışma	Ürün	Periyot	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Yöntemi	Bulanık Parametreler	Örnek Uygulama	Yönetmelik Hedefleri	Toplanan Ürün Kalitesi
Krikke ve diğ. (1999)	Tek ürün	Çok dönemli	C	MILP	-	Yazıcılar	-	-
Srivastava (2008)	Çok ürünlü	Çok dönemli	P	MILP	-	E-atık	-	-
Neto ve diğ. (2009)	Çok ürünlü	Tek dönemli	C, W, E	MOP, LCIA	-	E-atık	-	-
Achillas ve diğ. (2010)	Çok ürünlü	Tek dönemli	C	MILP	-	E-atık	-	-
Gomes ve diğ. (2011)	Çok ürünlü	Çok dönemli	C	SMILP	Re	E-atık	minr, mini	-
Alumur ve diğ. (2012)	Çok ürünlü	Çok dönemli	P	MILP	-	Çamaşır makinesi ve Kurutucular	-	-
Dat ve diğ. (2012)	Çok ürünlü	Tek dönemli	C	MILP	-	E-atık	-	-
Kilic ve diğ. (2015)	Çok ürünlü	Tek dönemli	C	MILP	-	E-atık	mini, minr	-
Ayvaz ve diğ. (2015)	Çok ürünlü	Tek dönemli	P	SMILP	Re, Qu, Tc	E-atık	-	2 çeşit (geri dönüştürülebilir, hurdaya ayrılan)
Xu ve diğ. (2017)	Çok ürünlü	Çok dönemli	C	MILP	Rl	E-atık	-	-
Shokouhyar ve Aalirezai (2017)	Çok ürünlü	Tek dönemli	P, En, S	MOGA, NSGA-II MILP	-	E-atık	-	-
John, Sridharan ve Kumar (2018)	Çok ürünlü	Tek dönemli	P	MILP	-	Mobil telefon, Dijital kameralar	-	2 çeşit (yüksek hurda değerli-yeniden üretilebilir ve düşük hurda değerli-geri dönüşüm/tamir)
John, Sridharan, Kumar, ve diğ. (2018)	Tek ürünlü	Çok dönemli	P	MILP	-	Buzdolapları	-	2 çeşit (Yüksek-yeniden üretim ve düşük-demontaj kalan yararlı ömür)
Doan ve diğ. (2019b)	Çok ürünlü	Tek dönemli	C	FMILP	Re, Qu, Tc, Cc, Dc, Fc, Ic, Rr,	E-atık	-	-
Messmann ve diğ. <b>Model 1</b>	Tek ürün	Tek dönemli	P, Ç	MILP, LCIA	De, Re	Cep Telefonu	-	-
<b>Model 2</b>	Çok ürünlü	Tek dönemli	P	FMILP	De, Re, Pc, Bp,	E-atık	mins, minr	4 çeşit hasar durumu
<b>Model 3</b>	Çok ürünlü	Çok dönemli	P	FMILP	De, Re, Pc, Bp,	E-atık	mins, minr	4 çeşit hasar durumu

Not\*: C: Maliyet minimizasyonu, P: Kar maksimizasyonu, W: Atık minimizasyonu, E: Kullanılan enerji minimizasyonu, En: Çevresel etki minimizasyonu, S: Sosyal fayda maksimizasyonu, Ç:Çevresel kazanç maksimizasyonu, '-': İlgisiz, MOP: Çok amaçlı doğrusal programlama, MOGA: Çok amaçlı genetik algoritma, NSGA-II: Dominant olmayan sıralama genetik algoritması, MILP: Karma tamsayı doğrusal modelleme, SMILP: Stokastik karma tam sayılı doğrusal modelleme, FMILP: Bulanık karma tam sayılı doğrusal modelleme, LCIA: Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi, De: Talep, Re: Toplanan miktar, Rl: Toplama düzeyi Qu: Toplanan ürün kalitesi, Tc: Taşıma maliyeti, Cc: Toplama maliyeti, Pc: Üretim maliyeti, Dc: Bertaraf maliyeti, Fc: Sabit maliyet, Ic: Gelir, Rr: Geri toplama oranı, Ri: Riskler, Ca: Kapasite, Bp: Ürün geri alma fiyatı, W: Ürün ağırlığı, Mini: Kişi başına düşen kilogram üzerinden toplama miktarı, Mins: Satışlar üzerinden minimum toplama miktarı, Minr: Minimum geri dönüşüm oranı

Tablo 2.1 incelendiğinde e-atık için tersine tedarik zinciri ağ tasarımı problemlerinde gerçekleştirilen çalışmaların genelde çok ürünlü olduğu ve çözüm yöntemi olarak karma tam sayılı doğrusal modellemenin kullanıldığı görülmektedir. Toplanan ürünlerin kalite seviyelerinin yeterli düzeyde incelenmediği geri dönüştürülebilir, geri dönüştürülmez ya da hurda değerli ve değersiz şekilde gerçek hayattaki durumu yeterli düzeyde karşılamayan tanımların kullanıldığı görülmektedir. Aynı zamanda kalitenin modellere dahil edilmesi sürecinde hangi toplanan ürünün hangi sürece gitmesi gerektiğini gelen ürünün kalite düzeyine, geri dönüştürülebilirlik oranına ve maliyetlerine göre modele bırakmak yerine modele veri olarak girmeleri gerçek durumu yansıtmamaktadır. Benzer şekilde, e-atık toplama sürecinin son yıllarda hız kazanması nedeni ile istatistiki veri kaynağının sınırlı olması, kayıtların düzenli tutulmaması gibi nedenlerle gerçek hayattaki karşılaşılan yenilenen ürüne olan taleplerin, toplanan ürün miktarı, kalitesi ve ağırlığı gibi verilerin belirsizliği üzerine özgün araştırma potansiyeli bulunmaktadır. Tezde tasarlanan üç farklı model ile bu alana katkı sağlanmaktadır. Geliştirilen modellerin özellikleri Tablo 2.2’de yer almaktadır.

**Tablo 2.2:** Tez kapsamında geliştirilen modellerin özellikleri

Geliştirilen Ağ Modeller	Yapısı	Ürün	Periyot	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Yöntemi	Bulanık Parametreler	Örnek Uygulama	Yönetmelik Hedefleri	Toplanan Ürün Kalitesi	Toplama Merkezlerinden Ürün Toplama Miktarı	Karar Verici
<b>Model 1</b>	Tersine Tedarik Zinciri Ağı	Çok ürünlü	Tek dönemli	P	FMILP	De, Re,Pc, Bp, Ic, W	E-atık	mins, minr	4 çeşit hasar durumu	Modelin belirlediği miktarda	Üretici/üretici grubu,/üçüncü parti firmalar tarafından oluşturulan bir yönetim organı olabilir
<b>Model 2</b>	Kapalı Döngü Tedarik Zinciri Ağı	Çok ürünlü	Tek dönemli	P	MILP	-	E-atık	mins, minr	4 çeşit hasar durumu	Modelin belirlediği miktarda	Üretici/üretici grubu,/üçüncü parti firmalar tarafından oluşturulan bir yönetim organı olabilir
<b>Model 3</b>	Tersine Tedarik Zinciri Ağı	Çok ürünlü	Çok dönemli	P	FMILP	De, Re,Pc, Bp, Ic, W	E-atık	mins, minr	4 çeşit hasar durumu	Anlaşma yapılan toplama merkezindeki tüm ürünler	Koordinasyon Merkezi

Not\*: P: Kar maksimizasyonu, '-': İlgisiz, MILP: Karma tam sayılı doğrusal modelleme, FMILP: Bulanık karma tam sayılı doğrusal modelleme, De: Talep, Re: Toplanan miktar, Pc: Üretim maliyeti, Ic: Gelir, Bp: Ürün geri alma fiyatı, W: Ürün ağırlığı, Mins: Satışlar üzerinden minimum toplama miktarı, Minr: Minimum geri dönüşüm oranı

Tablo 2.2’de yer alan Model 1 üretici sorumluluğu AEEKEY (2012)’de yer alan üretici sorumluluğu ve minimum geri kazanım hedefleri dikkate alınarak yönetmeliğe uyum ile birlikte gerçek hayatta ele alınması gereken bulanık tersine tedarik zinciri ağ tasarımını gerçekleştirirken; Model 2 ise aynı problem için kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımını gerçekleştirmek adına oluşturulmuştur. Son olarak Model 3 ise yönetmelikte kurulması öngörülen koordinasyon merkezinin kurulması ile ürün döngüsü ve maliyet akışının nasıl yapılabileceğinin gösterilebilmesi adına çok periyotlu bulanık tersine tedarik zinciri ağ tasarımını gerçekleştirmek adına oluşturulmuştur.

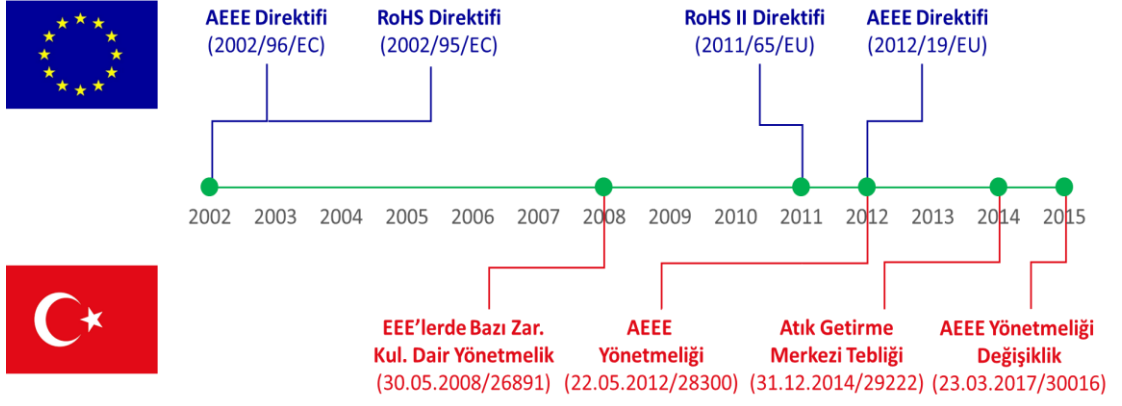
Tasarlanan bu üç modelde de Tablo 2.1’de görüldüğü gibi literatürden farklı olarak yönetmeliğin getirdiği minimum toplama hedefi olarak satışlar üzerinden minimum toplama miktarı dikkate alınmış ve kalite seviyelerinin model entegrasyonunda kalite düzeyine göre ürünün hangi sürece geçmesi gerektiği bilgisinin veri olarak verilmesi yerine problemde var olan duruma göre modele bırakılmış olup ağırlık gibi literatürde daha önce dikkate alınmamış verilerin belirsizliği dikkate alınmıştır. Aynı zamanda Model 3 ile literatürden farklı olarak aktör sorumluluklarının ayrıştırılması ile koordinasyon merkezi karar verici olarak literatürde ilk kez ele alınmıştır. Geliştirilen üç model de aynı problem için tasarlanmış olup Tablo 2.2’de görüldüğü ağ yapısı, çözüm yöntemi, anlaşma yapılan koordinasyon merkezlerinden toplanan ürün miktarları ve modeldeki karar verici açısından farklılıklar yer almaktadır. Modellerin özellikleri ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

### **3. ATIK ELEKTRİKLİ ve ELEKTRONİK EŞYALARIN (AEEE) KONTROLÜ YÖNETMELİĞİ ve DURUM ANALİZİ**

Tezde ele alınan elektronik atık kavramının, tezin sınırlarının ve dikkate alınması gereken gerekliliklerin daha ayrıntılı olarak incelenebilmesi adına ilgili yönetmeliklerin ayrıntılı olarak incelenerek yorumlanması önem arz etmektedir. Bu bölümde tezde ele alınan problem yapısının, aktör sorumluluklarının ve model kısıtlarının daha iyi anlaşılabilmesi adına Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar (AEEE) Yönetmeliği, yönetmelikteki aktör sorumlulukları ve Türkiye’de ve Avrupa Birliği ülkelerindeki yönetmelik durumları ve uygulamaları açıklanmaktadır.

#### **3.1 Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği**

Avrupa Birliği, 2002 yılında e-atıkların yönetimini ve sürdürülebilirliğini sağlamak adına bilgilendirme ve geri kazanım/geri dönüşüm hedefleri ile paydaşların sorumluluklarını belirleyen Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar (AEEE) Direktifi ve e-atıkların içerisindeki tehlikeli atıkların ne ölçüde sınırlandırılması gerektiği ve zararlı malzeme alternatiflerini belirten Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılması (RoHS) Direktifini yayımlamıştır. Türkiye’de de 22/5/2012 tarih ve 28300 sayılı Resmi Gazete’ de yayımlanarak yürürlüğe giren “Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği’nin uygulaması esnasında karşılaşılan sorunların giderilmesi adına ve Avrupa Birliği’nin 2012/19/EC sayılı Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya Direktifine yakınlaştırılması amacı ile Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından Ocak 2015’te hazırlanmış ve Mayıs 2016 tarihinde taslak yenilenmiştir. Buna göre AEEE direktifinin Avrupa Birliği ve Türkiye’deki mevzuat tarihçesi Şekil 3.1’de yer almaktadır.



**Şekil 3.1:** AB ve Türkiye'deki AEEE mevzuat tarihçesi (REC-Türkiye 2016)

Taslak, 10 Haziran 2016 tarihine kadar görüşe sunulmuş ve geri dönüşler alınmıştır. Ancak son taslak sonrasında yeni bir yönetmelik yayımlanmamıştır. Yeni yönetmeliğin yayımlanmaması nedeni ile 22/5/2012 tarihli yönetmelik hala geçerliliğini korumaktadır. Yönetmelikte yer alan aktörler ve toplama, geri kazanım ve geri dönüşüm hedeflerinin dikkate alınması gerekmektedir. Buna göre yönetmelikte yer alan toplama hedefleri Tablo 3.1'de, geri kazanım hedefleri Tablo 3.2'de, geri dönüşüm hedefleri ise Tablo 3.3'de yer almaktadır.

**Tablo 3. 1:** Yönetmeliğe göre toplama hedefleri (AEEKY 2012)

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

**Tablo 3.2:** Yönetmeliğe göre geri kazanım hedefleri (AEEEEKY 2012)

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

**Tablo 3.3:** Yönetmeliğe göre geri dönüşüm hedefleri (AEEEEKY 2012)

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

Yönetmelikte yer alan aktörler ve sorumlukları aşağıda yer almaktadır

**Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇSB):** Belediyelerin ve diğer aktörlerin yönetim planının uygunluğunu değerlendirerek onaylamak ve gerekli denetim ve izlemeleri yapmaktan sorumludur. Gerekli gördüğü durumlarda yetkilerinin bazılarını Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüklerine aktarabilmektedir (AEEEEKY 2012; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015; REC-Türkiye 2016).

**Çevre ve Şehircilik İl Müdürlükleri:** E-atık yönetiminde belediyeler, işletmeler, yetkilendirilmiş kuruluşlar, üreticiler vb. kuruluşlar arasında koordinasyonu sağlayan; getirme merkezleri, geri dönüşüm ve geri kazanım tesisleri tarafından hazırlanan belgeleri inceleyen ve denetleyen kurumdur. Ayrıca müdürlükler, taşıma araçlarına taşıma lisansı vermekle ve faaliyetlerini denetlemekle,



gerekli durumlarda lisansı iptal etmekle ve/veya yenilemekle görevlidir (AEEKEY 2012; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015; REC-Türkiye 2016).

**Büyükşehir Belediyeleri/Belediyeler:** Büyükşehir belediyeleri, AEEE'lerin il genelinde etkin toplanması amacıyla belediyelerce yürütülen çalışmaları koordine etmekle, bilgilendirme ve eğitim faaliyetlerine katılmakla yükümlüdür. Belediyeler ise e-atık yönetim planı hazırlanması, ÇSB'ye sunulması ve AEEE'lerin toplanmasıyla ilgili altyapı hizmetlerinin ve paydaşlar arasında iş birliğinin sağlanması ile sorumludur (AEEKEY 2012; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015; REC-Türkiye 2016).

**Yetkilendirilmiş Kuruluşlar (YK) ve Koordinasyon Merkezi:** Üreticilerin yönetmelikte belirtilen yükümlülükleri yerine getirmek için oluşturdukları ve ÇSB tarafından yetkilendirilmiş olan ve kar amacı gütmeyen kuruluşlardır.

YK'ların sorumlu oldukları görevleri aşağıda yer almaktadır.

- Yönetmelikte belirtilen toplama, geri kazanım/geri dönüşüm hedeflerini sağlamak,
- Atık yönetim planı hazırlayıp ÇSB'ye sunmak,
- Temsil ettiği üreticiler adına belediyeler ve geçici faaliyet belgeli/çevre izin ve lisanslı işleme tesisleri ile işbirliği yapmak,
- Yürütülen faaliyetleri izlemek,
- Sözleşme yaptığı belediyelerde veya atık toplama merkezlerinde toplanan AEEE'leri geri kazanımını sağlamak üzere tamamını geri almakla veya aldırarakla yükümlüdürler.

Yetkilendirilmiş kuruluşların ve yetkilendirilmiş kuruluş yapısına girmeden 17'nci maddeye göre teminat sunan üreticilerin, Bakanlıkla ve yerel yönetimlerle olan koordinasyonlarının sağlanması amacıyla, kâr amacı gütmeyen ortak bir Koordinasyon Merkezi kurmaları zorunludur. Koordinasyon merkezinin sorumlu olduğu görevler aşağıda yer almaktadır.

- Toplanan evsel AEEE'lerin üreticilerin pazar paylarına göre paylaşılması,

- Bakanlık tarafından oluşturulacak kayıt sistemine kayıt olan üreticilerin kayıt bilgilerinin doğrulanması,
- Belediyelerce toplanan evsel AEEE'lerin işleme tesislerine taşınarak çevre lisanslı tesislerde geri kazanım veya bertarafının sağlanması,
- Piyasaya sürülen, toplanan, ihraç edilen, yeniden kullanılan, geri dönüştürülen ve geri kazanılan AEEE miktarları ve oranları hakkında Bakanlığa rapor sunulmasını sağlamakla yükümlüdürler (AEEEKY 2012; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015; REC-Türkiye 2016).

**Elektrikli Elektronik Eşya (EEE) Üreticileri:** Kendi markasıyla elektrikli ve elektronik eşya üreten ve satan, kendi markasıyla başka tedarikçiler tarafından aldığı eşyaları satan, ticari amaçlarla elektrikli ve elektronik eşya ithal eden gerçek ve tüzel kişileri olarak tanımlanmaktadır. Toplama merkezlerinden (Atık Getirme Merkezi) atıkların taşınması, geri kazanımı veya bertarafının finansal yükünü, “üretici sorumluluğu” ilkesine referansla üstlenmek ve AEEE'lerin bilinçsiz işlem görmesinin, kayıt dışı ihracat ve ithalatının ve bertarafının önlenmesi için gerekli önlemleri almakla yükümlüdür (AEEEKY 2012; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015; REC-Türkiye 2016).

**AEEE İşleme Tesisleri:** AEEE'lerin yönetmelikte belirtilen geri dönüşüm ve geri kazanımının sağlanması için uygun yöntem ve teknolojileri kullanmakla, aktarma merkezleri aracılığıyla AEEE'lerin toplanmasını sağlamakla, tesise kabul edilen, işlenen ve bertaraf ettirilen atık miktarları ile geri kazanım ve/veya geri dönüşüm miktarlarına ilişkin olarak kayıt tutmak ve aylık faaliyet raporlarını ÇŞB'ye göndermekle görevlidir (AEEEKY 2012; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015; REC-Türkiye 2016).

**Tüketiciler:** AEEE'leri üreticilerin ve belediyelerin belirledikleri esaslara göre diğer evsel atıklardan ayrı olarak biriktirmekle, AEEE'lerini dağıtıcıların, belediyelerin, üreticilerin veya işleme tesislerinin oluşturdukları toplama yerlerine götürmekle veya götürülmesini sağlamakla ve kayıt dışı toplama yapanlara vermemekle yükümlüdürler.

Sonuç olarak Türkiye’de yayınlanan yönetmelik Avrupa Birliği AEEE direktifi ile benzer özelliklere sahip olup üretici sorumluluğu prensibine dayanmaktadır.

### **3.2 Avrupa Birliği (AB) Ülkelerindeki ve Türkiye’deki Elektronik Atık Uygulamaları ve Durum Analizi**

Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi Türkiye yönetmelik açısından ve uygulamalar açısından AB üyesi ülkeleri takip ederek sürece dahil olmuştur. Ülkeler arasında özellikle, kullanılmış veya kullanım ömrü dolmuş ürünlerin nasıl toplanacağı ve taşınacağı ile mali yükün nasıl üstlenileceği ile ilgili hem uygulama hem de sorumluluk paylaşımıyla ilgili farklı yaklaşımlar vardır. Literatürde de bu durum ilgi çekici bulunmuştur ve Türkiye ile AB üyesi ülkelerdeki yönetmelik ve durum incelemesi karşılaştırma çalışmaları üretilmiştir. Buna göre;

Turner ve Callaghan (2007) İngiltere’deki e-atık geri dönüşüm sürecindeki belirsizlikleri dikkate alarak sistem aktörlerini, toplama hedeflerinin değerlendirmesini yapmışlardır. Gamberini ve diğ. (2009), İtalya’daki e-atık geri dönüşüm sistemi tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Li ve diğ. (2013), e-atıkların global çerçevede dağıtımını incelemiş ve gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki e- atık yönetimini karşılaştırmışlardır. Kayıt dışı legal olmayan yollarla e-atık gönderimi üzerinde durarak teşvik sistemi ile küresel e-atık yönetiminin nasıl olması gerektiğini analiz etmişlerdir. Goodship ve Stevels (2012) yönetmeliklerin incelenmesinde üretici sorumluluğuna dikkat çekerek e-atık toplamanın özendirilmesi, kayıt dışı toplamanın önüne geçilmesi, teşvik ve ödül mekanizmalarının gerekliliğini ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında AB yönetmeliğini incelediklerinde; e-atıkların evsel/sınai veya tarihsel olarak ayrıştırılmasının, e-atık sınıflamanın uygulama ve kullanım alanına göre değil de toplama ve geri dönüşüm süreçlerine göre yapılmasından kaynaklı eksikliklerin olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, yönetmelikte hangi ürünlerin kapsamı kapsamayacağına açık olmaması, belediyelerce toplanan e-atık satış izninin verilmemesi, kayıt dışı e-atık satış ve ihracatına yönelik madde eksikliklerinin de olduğu görülmüştür. İmre ve diğ. (2016), Türkiye’deki e-atık yönetmeliğinde belirsizliklerin incelenmesinde Marmara Bölgesi için iki aşamalı Delfi araştırması ve

e-atık sistemine ilişkin paydaşların yer aldığı panel çalışması gerçekleştirmiş ve sonuçları paylaşmışlardır. Çalışmalarındaki yönetmelik ve durum incelemelerinde;

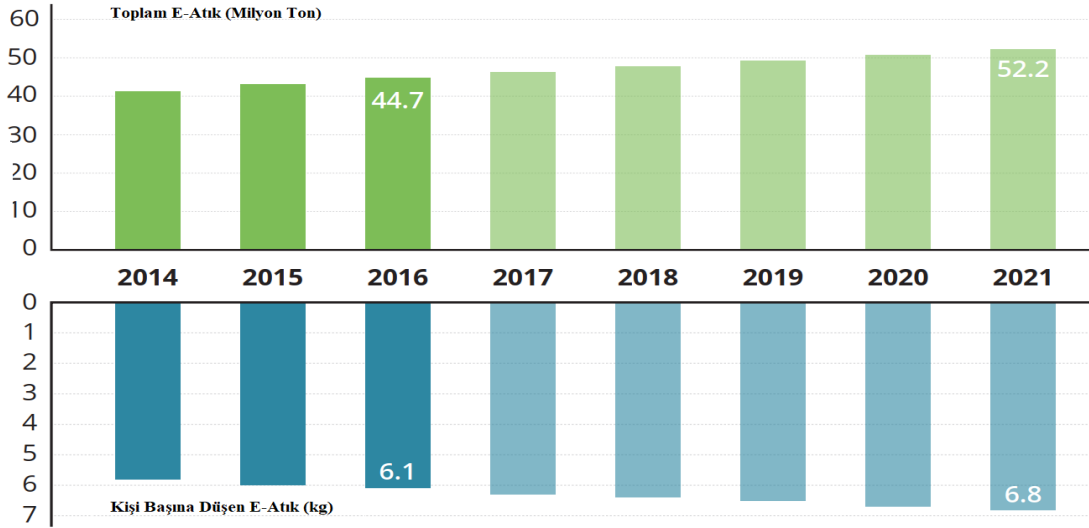
- Goodship ve Stevels (2012) çalışmasında yer alan AB yönetmeliğindeki belirsizliklerin benzer olduğu,
- Aktör sorumluluklarının net olmaması,
- Nakliye maliyet paylaşımının belirsizliği,
- Belediyelerce getirme merkezlerinin hala kurulmadığı,
- Yetkilendirilmiş kuruluş görev yetkilerinin ve üreticiler tarafından YK'lara aktarılacak teminatların maliyet kalemlerinin açık olmaması,
- Eysel olmayan e-atık için toplama/geri dönüşüm/geri kazanım hedeflerinin olmaması,
- Tüketiciler, e-atık getirme merkezlerine getirmekle yükümlü iken tüketicilerin e-atık sistemine nasıl dahil olacağı konusunda yönlendirmenin olmaması sonucuna ulaşmışlardır.

Dünyada, Avrupa ve Türkiye'deki yönetmelik durumları incelendiğinde yönetmelik kapsamındaki nüfus yüzdesi değerlerine ait veriler Tablo 3.4'de, Türkiye ile bazı AB üye ülkelerdeki yönetmelik durumu ve e-atık üretim miktarları Tablo 3.5'de yer almaktadır. Şekil 3.2'de ise 2014-2021 yılları arasındaki dünyada gerçekleşen ve tahmini e-atık miktarları gösterilmektedir.

**Tablo 3.4:** 2014 ve 2017 Yıllarındaki Yönetmelik Kapsamındaki Nüfusun Yüzdesi (Balde ve diğ. 2017) (%)

	2014	2017
Dünya	44	66
Doğu Avrupa	46	99
Kuzey Avrupa Doğu	99	100
Güney Avrupa	100	100
Batı Avrupa	99	100

Tablo 3.5 incelendiğinde 2014 yılında dünyadaki nüfusun %44'ünün (61 ülkede) e-atık yönetmeliğe tabi olduğu ve 2017 yılında ise bu değer %66'ya yükseldiği görülmektedir. Ayrıca tabloda 2017 yılında yönetmelik ile AB ülkelerinin nerede ise tüm nüfusunu kapsayacak şekilde sorumluluk yüklendiği görülmektedir.



**Şekil 3.2:** 2014-2021 yıllarında Dünyada gerçekleşen ve tahmini e-atık miktarı (Balde ve diğ. 2017)

Şekil 3.2 incelendiğinde 2016 yılında dünyada 44,7 milyon ton e-atık üretildiği ve kişi başına düşen e-atık miktarının 6.1 kg olduğu ve bu değerlerin 2021 yılına kadar artarak yükseleceği görülmektedir. Dünyada üretilen e-atık miktarının 12,3 milyon tonu yani %27,5'i AB ülkeleri tarafından üretilmekte ve AB ülkelerinde bu değer %35'i olan 4,3 milyon tonunun dokümanite edilerek toplanıp dönüştürüldüğü görülmektedir (Balde ve diğ. 2017). Türkiye'de oluşan e-atık miktarı 2014 yılında 503.000 ton, kişi başına düşen e-atık miktarı 6,5 kg, toplanan e-atık miktarı 9.500 ton ve kayıtlı toplama oranı %2 iken 2018 yılında kişi başına e-atık toplama hedefi 4 kg olarak yönetmelikte belirlenmiştir (REC-Türkiye 2016).

**Tablo 3.5:** 2017 Ocak itibari ile bazı Avrupa ülkeleri ve Türkiye'nin e-atık üretim ve uygulamadaki yönetmelik durumu (Balde ve diğ. 2017)

Ülke	Nüfus (x1000)	2016'da Üretilen E-atık (kg/Kişi)	2016'da Üretilen E-atık (kt.)	Ocak 2017'de Yürürlükte Yönetmelik
Almanya	82.571	22,8	1884	Evet
Avusturya	8691	20,9	182	Evet
Bosna Hersek	3854	6,5	25	Evet
Belarus	9451	7,6	72	Hayır
Çek Cumhuriyeti	10.561	15,9	168	Evet
Danimarka	5683	24,8	141	Evet
Fransa	64.569	21,3	1373	Evet
Moldova	3553	1,8	6,3	Hayır
Norveç	5263	28,5	150	Evet
İsveç	10.027	21,5	215	Evet
İsviçre	8325	22,2	184	Evet
Türkiye	78.967	7,9	623	Evet

Tablo 3.5’de incelenen AB üyesi ülkelerin Belarus ve Moldova haricinde e-atık yönetmeliğinin olduğu ve 2016 yılında Norveç’in kişi başına düşen e-atık miktarı olarak en fazla değere sahip olduğu görülmektedir. Türkiye incelendiğinde e-atık yönetmeliğine sahip olduğunun yanı sıra tablodaki ülkelere göre e-atık üretim potansiyelinin yüksek olduğu gözlenmektedir. Dolayısı ile AB ile Türkiye’deki genel yönetmeliklerin benzer yapıda olduğu ve benzer belirsizliklerin yer aldığı görülmektedir. Türkiye’de kayıtlı toplama geri dönüşüm oranı %2, AB ülkelerinde bu rakam %35 iken dünyada bu oran %20 civarındadır. Türkiye’de yönetmelik olmasına rağmen hala kurulması gereken toplama merkezi, geri dönüşüm merkezi sayısının yeterli sayıda olmadığı görülmektedir. AB ve ülkemizde e-atık toplama ve geri dönüşümünde ödül ve ceza mekanizmalarının oluşturularak teşvik edici çalışmaların hala yetersiz kalmaktadır. Ülkemizde denetim mekanizmasının yetersizliği ve maliyet kalemlerinin açık olmaması nedeniyle güncel verilere ulaşmada zorluklar yaşanmaktadır. Sonuç olarak, yönetmelik çerçevesinde atıklarının kontrolü ve bu kaynakları fırsata çevirme potansiyeline sahip olan Türkiye’nin bu alanda AB ülkeleri ile yarışır bir pozisyona gelmesi gerekliliğinin olduğu sonucu çıkarılabilir. Uygulamalar yönünden AB ülkeleri ile Türkiye’yi incelediğimizde, AB ülkelerinde e-atıkların toplanmasını belediyelerin ve EEE satış noktalarının icra ettiği görülmektedir. E-atıkların toplanması için belediyeler tarafında uygulanabilecek 3 ana yöntem bulunmakta ve karma olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, atık getirme merkezlerinden toplama, atık biriktirme noktalarından (Atık Kumbaraları) toplama ve kapıdan toplama. Aynı zamanda bazı AB ülkelerinde atık getirme merkezleri ücretsizken, kapıdan toplamanın, özellikle ev kapısından toplama yapılması halinde ise ücretli olduğu görülmektedir. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de sırası ile İsviçre ve Türkiye’deki toplama yöntemlerine örnek resimler yer almaktadır.



Şekil 3.3: Belediye toplama merkezi – İsviçre (REC-Türkiye 2016)



Şekil 3.4: Çorlu ve İzmit belediyeleri – Türkiye (REC-Türkiye 2016)

Tablo 3.6’da AB üye ülkelerde e-atıkların toplanmasından sorumlu tutulan kurumlar gösterilmektedir. Tabloya göre bazı ülkelerde e-atıkların fiziksel toplama sorumluluğunda tek bir kurum görevlendirilirken bazı ülkelerde ise dağıtım merkezi, üretici ve belediyelerin ortak olarak sorumlu olduğu görülmektedir. Yine aynı şekilde toplamadaki mali sorumluluk bazı ülkelerde tek bir kuruma yüklenirken bazı ülkelerde sorumluluk paylaştırılmıştır. Türkiye’de ise yönetmeliğe göre toplama sorumluluğu belediyelerde iken mali yükümlülük üreticilere düşmektedir.

**Tablo 3.6:** AB üye ülkelerdeki e-atıkların evlerden toplanmasındaki sorumluluklar (EC 2007)

Üye Ülke	Fiziksel Sorumluluk*	Mali Sorumluluk*
Almanya	B	B
Avusturya	D/B/Ü	D/Ü
Belçika	D/B	D
Birleşik Krallık	D/Ü	D/Ü
Bulgaristan	Ü	Ü
Çek Cumhuriyeti	D/Ü	D/Ü
Danimarka	B	B
Estonya	D/Ü	D/Ü
Finlandiya	D/Ü	Ü
Fransa	D/B/Ü	D/Ü
Hollanda	D/B	D/B
İrlanda	D/B	D/Ü
İtalya	D/B	D/B
İspanya	D/B	Ü
İsveç	Ü	Ü
Kıbrıs	Ü	Ü
Letonya	Ü	Ü
Litvanya	D/B/Ü	Ü
Lüksemburg	D/B	D/B
Macaristan	Ü	Ü
Malta	D/Ü	D/Ü
Polonya	D	D
Portekiz	D/B/Ü	D/Ü
Romanya	B	B
Slovakya	D/Ü	D/Ü
Slovenya	D/B	D/B
Yunanistan	Ü	Ü

\*B: Belediye, D: Devlet, Ü: Üretici

Aşağıda AB ülkeleri ile Türkiye’de yapılan bazı iyi uygulama örnekleri paylaşılmıştır.

**İsveç:** İsveç Çevre Kanunu’nda (The Swedish Environmental Code) kamu otoriteleri ve belediyeler, üreticilerin çalışmalarını denetlemekte çevre ve insan sağlığının korunması için yeni kurallar koyabilmektedir. Belediyeler, evsel AEEE’lerin toplanmasından sorumlu tutulmaktadırlar. İsveç’te ulusal düzeyde AEEE’lerin toplanması ve geri dönüşümünden sorumlu olan El-Kretsen (kar amacı gütmeyen hizmet girişimi) ile belediyeler arasında iş birliği kurulmuştur. Belediyeler, AEEE’lerin evlerden toplama sürecini yürütmekle ve ortaya çıkan maliyetleri karşılamakla görevlendirilirken; El-Kretsen’in ise atıkların taşınması, geri dönüşümü ve geri kazanımı süreçlerindeki sorumlulukları artırılmıştır. Elretur sistemi ile hane halkları e-atıklarını diğer atıklarla birlikte belediye toplama merkezlerine ücretsiz olarak bırakma hakkına sahip olurken, üreticiler de düşük maliyetler karşılığında kamu tesislerini, alt yapı ve kaynaklarını kullanma şansına sahip olmaktadır (REC-Türkiye 2016). Mevcut durumda İsveç’te, belediyelere ait 630 adet atık toplama tesisi



bulunmaktadır ve tesislere ek olarak El-Kretsen tarafından sokaklarda yerleştirilen ve aydınlatma gereçleri gibi küçük AEEE'leri toplayan konteynerler ile toplama sürecine katkı sağlanmaktadır. Belediyeler, 2011 yılında "özel kamyon ve araçlarla" e-atık toplama çalışmalarını başlatmış, belediyeler tarafından önceden belirlenen bir rota üzerinde belirli noktalarda hane halklarının e-atıklarını toplamaktadır. 2014 yılında YK tarafından yapılan hane halkı anketine göre, bireylerin %98,6'sı e-atıklarını nereye atmaları/göndermeleri gerektiğini bilmekte ve bireylerin neredeyse %100'ü atıklarını doğru yere bırakırken herhangi bir problemle karşılaşmadıklarını belirtmişlerdir.

**Slovenya:** Belediyeler, farkındalık yaratma ve atıkların ayrı toplanmasına yönelik bilinçlendirme çalışmalarında hedef kitlesini, okul çağındaki çocuklar ile hane halkları oluşturmaktadır. Ödüllü yarışmalar, projeler, bilgilendirme eğitimleri vb. çalışmalar ile okul çağındaki çocuklar değişim elçileri olarak nitelendirilmiştir (REC-Türkiye 2016). AB desteği 2010 yılında ile gerçekleştirilen proje kapsamında EEE üreticileri ve dağıtıcıları, e-atıkları toplamakta ve etkinliğe katılan hane halklarını AEEE yönetimi süreci hakkında bilgilendirmektedir.

**Finlandiya:** 2000 yılında dünya çapında büyük ilgi uyandıran "Cep Telefonu Fırlatma Dünya Şampiyonası" ile en uzağa cep telefonu fırlatan kişiler yeni bir cep telefonu ile ödüllendirilmiştir (REC-Türkiye 2016). Avrupa genelinde yaygınlaşmış ve ulusal şampiyonlara dönüşmüştür. Norveç ve Almanya'daki ulusal yarışmaların kazananları, Finlandiya'daki Dünya Şampiyonası'na gelme hakkı elde etmektedir.

**Türkiye (Konya Büyükşehir Belediyesi):** Türkiye'nin AEEE'lerin toplanmasındaki öncü belediyelerden biridir ve ilk belediye atık getirme merkezi de bu ilimizde kurulmuştur. 2008 yılında başlattığı çalışmalar ile toplanan elektronik atıkların ilgili lisanslı tesislere gönderilerek ayrıştırılıp tekrar hammaddeye dönüşmesini sağlamıştır. Bu şekilde 5 yılda 96 ton e-atığın geri dönüşümü sağlanmıştır.

**Türkiye (Konak Belediyesi):** Evinde veya iş yerindeki her türlü AEEE bulunan vatandaşlar, Konak Belediyesi'nin Çevre ve Koruma Müdürlüğünü arayarak ellerindeki e-atıkların bulunduğu yerden alınmasını sağlamıştır. Konak Belediyesi tarafından alınan e-atıklar, daha sonraki aşamada büyük konteynerlerin olduğu atık

toplama birimlerine taşınmakta ve bu projeye ortak olan ELDAY aracılığıyla toplanan e-atıklar geri dönüşüme gönderilmektedir (ELDAY 2016).

**Türkiye (Kadıköy Belediyesi):** İstanbul'un Kadıköy Belediyesi, 2008 yılında, elektronik atıkların çevreye zararsız bir şekilde toplanması ve geri dönüşümünün sağlanması için "Avrupa Birliği Şehir ve Belediyeler Hibe Programı" kapsamında desteklenen ve İsveç Torsby Belediyesi ortaklığı ile gerçekleşen "Elektrikli Elektronik Atıkların Kontrolü Yönetimi Projesi"ni başlatmıştır. Bu kapsamda, belediye tarafından atık toplama aracı alınmış, ilçenin çeşitli noktalarına (10 adet) atık toplama kutuları ve konteynerler yerleştirilmiş, kamuyu bilgilendirici duyurular yapılmış, ev ve iş yerlerinden gelen talepler doğrultusunda ücretsiz olarak AEEE'ler toplanmış ve yeniden kullanılabilir hale getirilebilen EEE'ler de "Anadolu'ya Yardım Kampanyası" ile çeşitli okullara gönderilmiştir. Proje kapsamında Kadıköy Belediyesi 2008-2010 yılları arasında 228.358 adet AEEE kategorisine giren atık toplamış ve 673 adet bilgisayarını yeniden kullanıma uygun hale getirmiştir (REC-Türkiye 2016).

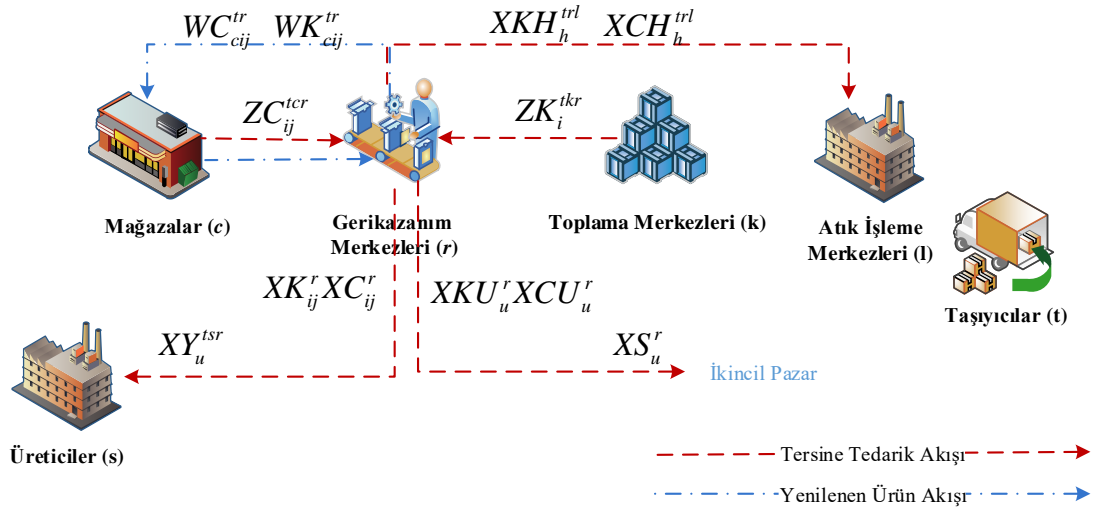
Sonuç olarak, Elektrik ve Elektronik Geri Dönüşüm ve Atık Yönetimi Derneği'ne (ELDAY) göre; AB ülkelerinde eski çalışan eşyaların toplanması adına teşvik sistemleri oluşturulmuş iken 2017 yılında ÖTV indirimi ile eskiyi getir yeniye götür şeklindeki kampanyaların uygulanmaması ile e-atık toplama miktarlarının düştüğü görülmektedir. AB ülkelerinde atıkların ayrıştırılması ve ayrı biriktirilmesi 1980'lere dayanırken ülkemizde bu kültür hala oturtulamamıştır. Bu nedenle de birebir çeviri yerine ülkemize özgü düzenlemeler ile yönetmeliğin yeniden şekillendirilmesi gerektiği ve bilinçlendirme ve eğitim çalışmalarına ağırlık verilmesi gerekliliği görülmektedir. Dolayısı ile ülkemizde yönetmelik gerekliliklerinin yerine getirilmesinde ve yönetmelikte yer alan aktör sorumluluklarının gerçek hayata nasıl etkin bir şekilde geçirilebileceğine dair yol gösterici çalışmalara gereksinim tezde gerçekleştirilen modellerin uygulamaya da önemli katkı sağlayacağını göstermektedir.

## **4. ÜRÜN YENİLEME SÜREÇLERİNİ İÇEREN BULANIK TERSİNE TEDARİK ZİNCİRİ AĞ TASARIMI (MODEL 1)**

Bir önceki bölümde de anlatıldığı üzere ülkemizde e-atık konusu ile ilgili yönetmelik olmasına rağmen yönetmeliğin gerçek hayatta nasıl uygulanabileceği ve özellikle yönetmelikte üreticilere yüklenen sorumlulukları yerine getirebilmeleri için bu süreci nasıl daha etkin bir şekilde yürütülebileceği ile ilgili karar desteğinin sağlanması gerekmektedir. Bu bölümde tasarlanan model, bu gerekliliği yerine getirmek adına AEEKY (2012)'de yer alan üretici sorumluluğunu dikkate alarak yönetmeliğe uyum ile birlikte gerçek hayatta ele alınması gereken bulanık tersine tedarik zinciri ağ tasarımını gerçekleştirmek amacı ile oluşturulmuştur. Model, mağaza, geri dönüşüm merkezi ve üretici olarak etkileşimli üç karar vericinin merkezinde olup e-atık yaşam döngüsü, kullanılan malzeme çeşitliliği ve istatistik veri yetersizliği nedeni ile bulanık olarak kurgulanmıştır.

### **4.1 Modelleme Ortamı**

Gerçekleştirilecek olan bulanık tersine tedarik zinciri ağı, belirli varsayımlar altında; e-atıkların toplanması, ayrıştırılması, demontaj ve yenileme faaliyetleri sonrasında yeniden kullanılarak oluşan ürün veya yarı mamul/hammaddelerin dağıtım süreçleri zararlı malzemelerin bertarafı ve taşınmasını birlikte değerlendiren modelin tasarlanarak üreticilere fayda sağlanması hedeflenmektedir. Modelde yer alan satış bedelleri, ağırlık, kalite ve miktara dayalı alış bedelleri, yenileme ve demontaj bedelleri ile talepler bulanık olarak ele alınmıştır. Modelde, literatürdeki sonuçlar çerçevesinde üreticiler, yenileme ve demontaj/ayırma süreçlerini kendi bünyesinde yürütmektedir. Modelin ana yapısı Şekil 4.1'de yer almaktadır.



Şekil 4.1: Tersine tedarik zinciri ağ tasarımı

Üretici (s), satış işlemlerini farklı mağazalarda (c) gerçekleştirmekte olup mağazalarda geri toplama işlemini gerçekleştirmek için toplanan ürünlerin (i) farklı hasar durumlarına (j) göre farklı satın alış bedelleri üzerinden yenilenen ürün satışı yapmaktadır. Mağazalar muayene işlemlerini kendi bünyelerinde gerçekleştirmekte olup fiyatlama yetkisine sahiptirler. Hasar durumlarına göre farklı bedellerle satın alınan kullanılmış ürünler, kampanya ve teknoloji yenileme gibi nedenlerle ürün ömrünü tamamlamadan toplanabileceği nedeni ile toplama merkezlerine göre daha pahalı fakat daha kaliteli olduklarından yenileme işleminde daha etkin olarak kullanılabilirlerdir. Geri kazanım merkezi (r), ürünlerin muayene, yenileme ve ayrıştırma işlemlerini yürütmekte olup muayene sonrası toplanan ürünlerin hasar durumlarına göre yenileme veya yarı mamul, yararlı ve zararlı malzemelere (u) ayrıştırma işlemlerine karar vermektedir. Geri kazanım merkezi, aynı zamanda üreticinin yeniden üretim için ihtiyaç duyduğu yarı mamul ve faydalı malzemeleri üreticilere gönderip fazla üretimi ikincil pazarda, yenilenen ürünleri de mağazalarda satma işlemlerini gerçekleştirmektedir. Ürün geri toplama noktaları (k) AEEE yönetmeliği çerçevesinde belediyeler gibi farklı kanallar tarafından yönetilmektedir. Toplama merkezlerinde toplanan atıklar belediyelerin süreçte desteklenmesi adına belli bir satın alma bedeli üzerinden yığın halinde fakat mağazalarda toplanan ürünlere göre daha düşük kaliteli olarak satın alınmaktadır. Atık işleme merkezi (l) doğaya zararlı olan kullanılmayacak durumdaki atıkların (h) yakma ve gömme gibi atık bertaraf işlemlerini gerçekleştirmektedir. Ürünlerin, atıkların ve yararlı ve zararlı

malzemelerin gönderimi farklı kapasite ve farklı tipteki taşıyıcılar ( $t$ ) tarafından gerçekleştirilmektedir.

Modelde gerçek hayattaki belirsizlikleri daha iyi yansıtabilmek adına yenilenen ürünün birim satış fiyatı, ürün kategorilerine göre ürün ağırlıkları, mağazalardan ve toplama merkezinden alınan ürünlerin hasar durumlarına göre alış bedelleri, geri kazanım merkezlerindeki birim yenileme maliyeti ve birim demontaj maliyetleri ile yenilenen ürün ve yarı mamul/yararlı ürün talepleri bulanık olarak tanımlanmıştır.

Modelde yer alan varsayımlar şunlardır:

### ***Varsayımlar***

- Mağaza ve geri kazanım merkezi, depo yönetim giderleri dikkate alınmamıştır.
- E-atık toplama maliyetlerinin toplama merkezleri ve/veya mağazalardan satın alma maliyetlerine dahil edileceği varsayılmıştır.
- Mağazalarda ürünler muayene edilerek hasar durumlarına göre ayrılmaktadır. Muayene bedeli mağazaya aittir.
- Talep fazlası üretilen tüm yarı mamul ve yararlı ürünler ikincil pazarlarda satılmaktadır.
- Yenilenemeyip kullanılmayan zararlı malzemeler atık işleme merkezlerine gönderilmektedir.
- Tek bir planlama periyodu dikkate alınmıştır.
- Talepler bölünebilir.

## **4.2 Önerilen Matematiksel Model**

Modelde kullanılan indisler, parametreler, karar değişkenleri ve kısıtlar aşağıda yer almaktadır. Parametre ve karar değişkenlerinin maliyet, gelir, kazanç ve fiyat değerleri para birimi;  $i$  ürünü ile ilgili miktar, talep ve kapasite değerleri adet; ağırlık,  $u$  ve  $h$  ile ilgili miktar, talep ve kapasite değerleri ağırlık birimi (kilogram (kg) vb.); mesafe değerleri mesafe birimi (kilometre (km) vb.), oran ve yüzde değerleri yüzde

olarak dikkate alınmıştır. Tezin devam eden bölümlerinde sunulacak Model 2 ve Model 3 için de aynı yaklaşım benimsenmiştir.

### ***İndisler ve Kümeler***

$i \in I$	Ürün grubu kümesi
$s \in S$	Üretici kümesi
$c \in C$	Mağaza kümesi
$t \in T$	Taşıyıcı kümesi
$r \in R$	Geri kazanım merkezi kümesi
$k \in K$	Toplama merkezi kümesi
$l \in L$	Atık işleme merkezi kümesi
$h \in H$	Zararlı malzeme kümesi
$u \in U$	Yarımamul/yararlı malzeme kümesi
$j \in J$	Hasar durumu kümesi

### ***Parametreler***

$\tilde{\ell}_i$	Yenilenen ürün $i$ birim satış fiyatı
$\tilde{a}_i$	Ürün $i$ 'nin birim ağırlığı
$\tilde{g}c_{ij}$	Toplanan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünün mağazadan birim satın alış fiyatı
$\tilde{g}k_{ik}$	Toplanan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünün toplama merkezi $k$ 'dan birim satın alış fiyatı
$\tilde{q}r_{ijr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $j$ hasar durumundaki $i$ ürünün birim yenileme maliyeti
$\tilde{q}d_{ir}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $i$ ürünün birim demontaj maliyeti ( <i>sökme, parçalama içinde</i> )
$\tilde{d}r_{ci}$	Mağaza $c$ 'nin $i$ yenilenen ürün talebi
$\tilde{d}u_{us}$	Üretici $s$ 'nin $u$ yarı mamul/yararlı ürün talebi
$in_i$	Ürün $i$ birim muayene maliyeti
$w_i^k$	Toplama merkezi $k$ 'nın elinde bulundurduğu $i$ ürün miktarı
$h_i^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $i$ ürünü için birim taşıma maliyeti
$h_h^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $h$ zararlı malzeme için birim taşıma maliyeti
$h_u^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $u$ yarı mamul/yararlı malzeme için birim taşıma maliyeti

$pp_{ij}$	Toplama merkezlerindeki $i$ ürününü $j$ hasar durumu yüzdesi
$pu_{iju}$	$j$ hasar durumundaki $i$ ürün için $u$ yarı mamul/yararlı malzeme ağırlık yüzdesi
$ph_{ijh}$	$j$ hasar durumundaki $i$ ürün için $h$ zararlı malzeme ağırlık yüzdesi
$mr_u^s$	Üretici $s$ 'nin $u$ yarı mamul/yararlı malzeme marjinal kazanç değeri
$mh_h^l$	Atık işleme merkezi $l$ 'nin $h$ zararlı malzeme için birim bertaraf maliyeti
$mu_u$	$u$ yarı mamul/yararlı malzeme birim satış fiyatı
$minr_i$	Ürün $i$ için minimum geri kazanım oranı
$mins_i$	Ürün $i$ için minimum toplama miktarı
$sl_{ij}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü için verimlilik oranı
$y_i^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $i$ ürünü için yenileme kapasitesi
$tcr_c^r$	Mağaza $c$ ile geri kazanım merkezi $r$ arasındaki mesafe
$tkr^{kr}$	Toplama merkezi $k$ ile geri kazanım merkezi $r$ arasındaki mesafe
$tlr^{lr}$	Atık işleme merkezi $l$ ile geri kazanım merkezi $r$ arasındaki mesafe
$tsr^{sr}$	Üretici $s$ ile geri kazanım merkezi $r$ arasındaki mesafe
$pr_i^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin ürün $i$ için minimum yenileme miktarı
$ca_{ic}$	Mağaza $c$ 'nin ürün $i$ için toplama kapasitesi
$vi_i^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $i$ ürünü için taşıma kapasitesi
$vh_h^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $h$ zararlı malzeme için taşıma kapasitesi
$vu_u^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $u$ yarı mamul/yararlı malzeme için taşıma kapasitesi

### **Karar Değişkenleri**

$WC_{cij}^{tr}$	Mağaza $c$ 'nin geri kazanım merkezi $r$ 'den mağazalardan toplanan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü kullanılarak $t$ taşıyıcısı ile karşılanan $i$ yenilenen ürün talep miktarı
$WK_{cij}^{tr}$	Mağaza $c$ 'nin geri kazanım merkezi $r$ 'den toplama merkezlerinden toplanan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü kullanılarak $t$ taşıyıcısı ile karşılanan $i$ yenilenen ürün talep miktarı
$ZK_i^{kr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin toplama merkezi $k$ 'den $t$ taşıyıcı kanalı ile satın aldığı $i$ ürün miktarı
$ZC_{ij}^{tr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin mağaza $c$ 'den $t$ taşıyıcı kanalı ile satın aldığı $j$ hasar durumundaki $i$ ürün miktarı

$XC_{ij}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin mağazalardan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü olarak karşıladığı demontaj miktarı
$XK_{ij}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin toplama merkezlerinden $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü olarak karşıladığı demontaj miktarı
$XKU_u^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $t$ taşıyıcı aracılığı ile toplama merkezlerinden alınan ürünlerden elde ettiği $u$ yarı mamul/yararlı malzeme miktarı
$XCU_u^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $t$ taşıyıcı aracılığı ile mağazalardan alınan ürünlerden elde ettiği $u$ yarı mamul/yararlı malzeme miktarı
$XKH_h^{trl}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin atık işleme merkezi $l$ 'ye $t$ taşıyıcı aracılığı ile toplama merkezlerinden alınan ürünlerden elde ettiği $h$ zararlı malzeme gönderim miktarı
$XCH_h^{trl}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin atık işleme merkezi $l$ 'ye $t$ taşıyıcı aracılığı ile mağazalardan alınan ürünlerden elde ettiği $h$ zararlı malzeme gönderim miktarı
$XY_u^{tsr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'den üretici $s$ 'nin $t$ taşıyıcı aracılığı ile karşılanan $u$ yarı mamul/yararlı malzeme talep miktarı
$XS_u^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'den ikincil pazarlara satılan $u$ yarı mamul/yararlı malzeme miktarı
$YR_{cij}^{tr}$	1: mağaza $c$ 'nin $j$ hasar durumundaki $i$ yenilenen ürün talebi geri kazanım merkezi $r$ 'den $t$ taşıyıcısı yolu ile karşılanması durumunda; 0 diğer durumlarda.
$RI_i$	Yenilenen ürün $i$ satışından elde edilen toplam gelir
$RU_u$	$u$ yarı mamul/yararlı ürün satışından elde edilen toplam gelir ( <i>marjinal gelir+satış geliri</i> )
$CTR_i$	Kullanılmış/kullanım ömrü dolmuş ve yenilenen ürün $i$ için tersine lojistik maliyeti ( <i>taşıma maliyeti</i> )
$CIR_i$	Kullanılmış/kullanım ömrü dolmuş ve yenilenen ürün $i$ için tersine tedarik zinciri maliyeti ( <i>satınalma+muayene+yenileme+demontaj maliyeti</i> )
$CU_u$	$u$ yarı mamul/yararlı ürün için toplam maliyet ( <i>taşıma maliyeti</i> )
$CH_h$	$h$ zararlı malzemeler için toplam maliyet ( <i>atık bertaraf+taşıma maliyeti</i> )

### **Bulanık Karma Tamsayılı Programlama Modeli**

$$\text{maximize} \quad \sum_{i \in I} (RI_i - CTR_i - CIR_i) + \sum_{u \in U} (RU_u - CU_u) - \sum_{h \in H} (CH_h) \quad (4.1)$$

### **Hesaplamalar**

$$RI_i = \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \tilde{e}_i (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \quad \forall i \in I \quad (4.2)$$

$$RU_u = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} m_r^s XY_u^{tsr} + \sum_{r \in R} m_u^r XS_u^r \quad \forall u \in U \quad (4.3)$$

$$CTR_i = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} h_i^t tkr^{kr} ZK_i^{tkr} + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} h_i^t tcr^{cr} (ZC_{ij}^{tr} + WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \quad \forall i \in I \quad (4.4)$$



$$\begin{aligned}
CIR_i = & \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \tilde{g} c_{ij} ZC_{ij}^{tcr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \tilde{g} k_{ik} ZK_i^{tkr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \tilde{g} i_{ik} ZK_i^{tkr} \\
& + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \tilde{q} r_{ijr} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) + \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \tilde{q} d_{ir} (XC_{ij}^r + XK_{ij}^r) \quad \forall i \in I
\end{aligned} \tag{4.5}$$

$$CU_u = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} tsr^{sr} h_u^t XY_u^{tsr} \quad \forall u \in U \tag{4.6}$$

$$CH_h = \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} h_h^t tr^{lr} (XCH_h^{trl} + XKH_h^{trl}) + \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} mh_h^l (XCH_h^{trl} + XKH_h^{trl}) \quad \forall h \in H \tag{4.7}$$

### Kısıtlar

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \leq \tilde{d} r_{ci} \quad \forall c \in C, i \in I \tag{4.8}$$

$$WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr} \geq YR_{cij}^{tr} \quad \forall t \in T, r \in R, c \in C, i \in I, j \in J \tag{4.9}$$

$$WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr} \leq M \cdot YR_{cij}^{tr} \quad \forall t \in T, r \in R, c \in C, i \in I, j \in J \tag{4.10}$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \leq y_i^r \quad \forall r \in R, i \in I \tag{4.11}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} ZK_i^{tkr} \leq w_i^k \quad \forall i \in I, k \in K \tag{4.12}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} ZK_i^{tkr} + \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} ZC_{ij}^{tcr} \geq \text{mins}_i \quad \forall i \in I \tag{4.13}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} ZC_{ij}^{tcr} \leq ca_{ic} \quad \forall c \in C, i \in I \tag{4.14}$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) - \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} pr_i^r YR_{cij}^{tr} \geq 0 \quad \forall i \in I, r \in R \tag{4.15}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{c \in C} ZC_{ij}^{tcr} = \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} WC_{cij}^{tr} + XC_{ij}^r \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \tag{4.16}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XC_{ij}^r sl_{ij}^r \tilde{a}_i pu_{iju} = XCU_u^r \quad \forall r \in R \quad \forall u \in U \tag{4.17}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XC_{ij}^r sl_{ij}^r \tilde{a}_i ph_{ijh} = \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} XCH_h^{trl} \quad \forall r \in R \quad \forall h \in H \tag{4.18}$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{r \in R} XY_u^{tsr} \leq vu_u^t \quad \forall t \in T, u \in U \tag{4.19}$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{r \in R} (XKH_h^{trl} + XCH_h^{trl}) \leq vh_h^t \quad \forall t \in T, h \in H \tag{4.20}$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \leq vi_i^t \quad \forall t \in T, i \in I \tag{4.21}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} pp_{ij} ZK_i^{tkr} = \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} WK_{cij}^{tr} + XK_{ij}^r \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \tag{4.22}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XK_{ij}^r s l_{ij}^r \tilde{a}_i p u_{iju} = XKU_u^r \quad \forall r \in R \quad \forall u \in U \quad (4.23)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XK_{ij}^r s l_{ij}^r \tilde{a}_i p h_{ijh} = \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} XKH_h^{trl} \quad \forall r \in R \quad \forall h \in H \quad (4.24)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{s \in S} XY_u^{tsr} + XS_u^r = XCU_u^r + XKU_u^r \quad \forall u \in U, r \in R \quad (4.25)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} XY_u^{tsr} = \tilde{d}u_{us} \quad \forall u \in U, s \in S \quad (4.26)$$

$$\left( \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} (XC_{ij}^r + XK_{ij}^r) + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \right) \geq \quad (4.27)$$

$$\left( \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} ZC_{ij}^{tcr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} ZK_i^{tkr} \right) \min r_i \quad \forall i \in I$$

$$WC_{cij}^{tr}, WK_{cij}^{tr}, ZK_i^{tkr}, ZC_{ij}^{tcr}, XC_{ij}^r, XK_{ij}^r, XKU_u^r, XCU_u^r, XKH_h^{trl}, XCH_h^{trl}, XY_u^{tsr}, XS_u^r \geq 0$$

$$YR_{cij}^{tr} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, i \in I, j \in J, k \in K, t \in T, r \in R, u \in U, h \in H, l \in L \quad (4.28)$$

Amaç fonksiyonu (4.1), bulanık tersine tedarik zinciri ağ tasarımında gelir elde edilen ürün grubu satışı ve yarı mamul veya yararlı malzeme satışlarından toplanan ve satışı yapılan ürün gruplarına göre muayene, parçalama, yenileme ve taşıma maliyetleri ile zararlı malzemelerin taşınması ve yok edilmesi için gerekli maliyetlerinin çıkarılması sonucu bulunan toplam kazancın maksimizasyonudur. Denklem (4.2), yenilenen ürün satışlarından elde edilen toplam geliri hesaplar. Denklem (4.3), üretilen yararlı malzemelerin satışından elde edilen geliri hesaplar. Denklem (4.4), tersine lojistik maliyetleri olan toplama merkezi ve mağazalarda toplanan kullanılmış veya atık ürünlerle, yenilenen ürünlerin taşıma maliyetini tanımlar. Denklem (4.5), tersine maliyetlerden toplama merkezi ve mağazalarda toplanan kullanılmış veya atık ürünlerle, yenilenen ürünlerin satın alma, muayene, yenileme ve parçalama maliyetlerini tanımlar. Denklem (4.6), üretilen yarı mamul ve yararlı malzemelerin üreticilere gönderme maliyetlerini hesaplar. Denklem (4.7), üretilen zararlı malzemelerin yok etme ve taşıma maliyetlerini hesaplar. Denklem (4.8), (4.9), (4.10) birinci yenilenen ürün üretim ve talep kısıtlarıdır. Denklem (4.11), geri kazanım merkezlerinin kapasite kısıtıdır. Denklem (4.12), toplama merkezlerindeki ürün dengesini tanımlar. Kısıt (4.13), yönetmelikte yer alan üreticilerin ürün gruplarına göre minimum geri toplama hedeflerini tanımlar. Kısıt (4.14), mağazaların toplanan ürünler için kapasite kısıtını tanımlar. Kısıt (4.15) geri

kazanım merkezlerinin bir üründen minimum kabul edilebilir yenileme miktarlarını tanımlar. Kısıt (4.16) mağazalardan alınan kullanılmış veya atık ürünlerin ürün dengesini tanımlar. Denklem (4.17), (4.18) geri kazanım merkezlerindeki mağazalardan alınan kullanılmış ürün gruplarına göre yarı mamul veya yararlı malzeme ve zararlı malzeme dönüşüm değerlerini tanımlar. Kısıt (4.19), taşıyıcıların yarı mamul ve yararlı malzemeler için kapasite kısıtıdır. Kısıt (4.20) taşıyıcıların zararlı malzemeler için kapasite kısıtı iken, Kısıt (4.21) taşıyıcıların yenilenen ürün kapasite kısıtıdır. Kısıt (4.22) toplama merkezlerinden alınan kullanılmış veya atık ürünlerin ürün dengesini tanımlar. Kısıt (4.23) ve (4.24) geri kazanım merkezlerindeki ürün gruplarına göre yarı mamul veya yararlı malzeme ve zararlı malzeme dönüşüm değerlerini tanımlar. Kısıt (4.25) ve (4.26) üreticilerin yarı mamul veya yararlı malzeme ürün dönüşüm dengesi ve talep kısıtlarıdır. Kısıt (4.27), ürün gruplarına göre yönetmelikte yer alan minimum geri dönüşüm kısıtını tanımlar. Son olarak Kısıt (4.28) değişkenlerin doğasını tanımlar.

Tasarlanan model ile literatürde yer alan diğer modellerden farklı olarak kısıt 4.13'deki minimum toplama hedefi olarak satışlar üzerinden minimum toplama miktarı dikkate alınmıştır. Ayrıca toplanan ürünlerin farklı kalite seviyelerinin modele entegrasyonunda modele veri olarak girilmesi yerine problemin yapısına göre model tarafından karar verilmesi sağlanmış olup ağırlık gibi daha önce dikkate alınmamış verilerin belirsizliği de dikkate alınmıştır.

### **4.3 Model Dönüşümü**

Modelde yer alan bazı parametreler, e-atıkların özelliği gereği yeterli verinin bulunmaması, toplanan ürünlerin kalitesi veya içeriğinden parça alınıp alınmadığı gibi durumlarının kontrol işlemi yapılmadan bilinmemesi gibi belirsizlikler nedeni ile daha gerçekçi ve etkili sonuçların üretilebilmesi adına bulanık değerlerle tanımlanmıştır. Bulanık modelde, bulanık değerler belli değerlerdeki üyelik fonksiyonları ile durulaştırılarak parametre değerleri hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, durulaştırma yöntemi olarak literatürde kabul gören Jiménez (1996) tarafından önerilerek Jiménez ve diğ. (2007), Parra ve diğ. (2005) ve Pishvae ve Torabi (2010) tarafından geliştirilen parametrelerin bulanık olduğu durumlarda beklenen aralıkların

karşılaştırılması yolu ile bulanık sayıların sıralama yöntemi kullanılmıştır. Yöntem doğrusal parametreleri koruyarak doğrusal problemleri çözmek için bulanık parametreleri karşılaştırmayı amaçladığından hesaplama açısından verimli bir yöntem olup büyük modellerin çözümlerinde kullanılabilir (Polat ve diğ. 2018). Yönteme göre bulanık üçgensel bir sayı ( $e^p, e^m, e^0$ ) iken, üyelik fonksiyonu şu şekilde tanımlanmaktadır (Jiménez ve diğ. 2007):

$$\mu_{\tilde{e}}(x) \left\{ \begin{array}{lll} f_e(x) = \frac{x - e^p}{e^m - e^p} & \text{eğer} & e^p \leq x \leq e^m \\ 1 & \text{eğer} & x = e^m \\ g_e(x) = \frac{e^0 - x}{e^0 - e^m} & \text{eğer} & e^m \leq x \leq e^0 \\ 0 & \text{eğer} & x \leq e^p \text{ veya } x \geq e^0 \end{array} \right\} \quad (4.29)$$

Bulanık üçgensel bulanık sayı için beklenen aralık (El) ve beklenen değeri (EV) Denklem (4.30) ve (4.31)'e göre hesaplanmaktadır (Jiménez 1996).

$$\begin{aligned} El(\tilde{e}) &= [E_1^e, E_2^e] = \left[ \int_0^1 f_e^{-1}(x) dx, \int_0^1 g_e^{-1}(x) dx, \right] \\ &= \left[ \frac{1}{2}(e^p + e^m), \frac{1}{2}(e^m + e^0), \right] \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$EV(\tilde{e}) = \frac{E_1^e + E_2^e}{2} = \frac{e^p + 2e^m + e^0}{4} \quad (4.31)$$

Sıralama yöntemi bir çift bulanık sayı için üyelik fonksiyonunun ( $\mu_M$ ) hesaplanmasını gerektirir.  $\tilde{a}$  ve  $\tilde{b}$  bir çift bulanık sayı ve  $\tilde{a}$  değerinin  $\tilde{b}$  değerinden büyük olduğunu açıklamak için  $\mu_M(\tilde{a}, \tilde{b})$  üyelik fonksiyonu Denklem (4.32) ile tanımlanmaktadır (Jiménez 1996).

$$\mu_M(\tilde{a}, \tilde{b}) \left\{ \begin{array}{lll} 0 & \text{eğer} & E_2^a - E_1^b < 0 \\ \frac{E_2^a - E_1^b}{E_2^a - E_1^b - (E_1^a - E_2^b)} & \text{eğer} & 0 \in [E_1^a - E_2^b < 0, E_2^a - E_1^b] \\ 1 & \text{eğer} & E_2^a - E_1^b > 0 \end{array} \right\} \quad (4.32)$$

Eğer  $\mu_M(\tilde{a}, \tilde{b}) \geq \alpha$   $\alpha$  değeri bir derece ise  $\tilde{a}$  ve  $\tilde{b}$  arasındaki ilişki  $\tilde{a} \geq_{\alpha} \tilde{b}$  şeklinde yazılabilir.  $\tilde{a} \geq_{\alpha/2} \tilde{b}$  ve  $\tilde{a} \leq_{\alpha/2} \tilde{b}$  ilişkisi aynı anda ele alınırsa  $\tilde{a}$   $\alpha$  derecesinde  $\tilde{b}$ 'ye eşit olduğu söylenebilir. Bu durum, Denklem (4.33)'deki şekilde ifade edilmiştir (Parra ve diğ. 2005).

$$\frac{\alpha}{2} \leq \mu_M(\tilde{a}, \tilde{b}) \leq 1 - \frac{\alpha}{2} \quad (4.33)$$

Bu tanımlara göre üçgen üyelik fonksiyonuna sahip aşağıdaki bulanık matematiksel denklemler durulaştırma için örnek olarak verilmiştir (Pishvae ve Torabi 2010).

$$\tilde{a}_i x \geq \tilde{b}_i \quad i = 1, \dots, l \quad (4.34)$$

$$\tilde{a}_i x = \tilde{b}_i \quad i = l+1, \dots, m \quad (4.35)$$

Bu denklemler Denklem (4.34) ve (4.35) göz önünde bulundurularak aşağıdaki şekilde yazılmıştır.

$$\left[ (1-\alpha)E_2^{ai} + \alpha E_1^{ai} \right] x \geq \alpha E_2^{bi} + (1-\alpha)E_1^{bi} \quad i = 1, \dots, l \quad (4.36)$$

$$\left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)E_2^{ai} + \left(\frac{\alpha}{2}\right)E_1^{ai} \right] x \geq \left(\frac{\alpha}{2}\right)E_2^{bi} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)E_1^{bi} \quad i = l+1, \dots, m \quad (4.37)$$

$$\left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right)E_2^{ai} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)E_1^{ai} \right] x \leq \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)E_2^{bi} + \left(\frac{\alpha}{2}\right)E_1^{bi} \quad i = l+1, \dots, m$$

$$\left[ (1-\alpha) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \alpha \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] x \geq \alpha \frac{b_i^m + b_i^0}{2} + (1-\alpha) \frac{b_i^p + b_i^m}{2} \quad i = 1, \dots, l \quad (4.38)$$

$$\left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] x \geq \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{b_i^m + b_i^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{b_i^p + b_i^m}{2} \quad i = l+1, \dots, m \quad (4.39)$$

$$\left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] x \leq \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{b_i^m + b_i^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{b_i^p + b_i^m}{2} \quad i = l+1, \dots, m$$

Durulaştırma işleminin arka planının oluşturulmasından sonra çalışmadaki modele eşdeğer keskin model yapısı oluşturulabilir. Modelde kullanılan bulanık değerler: yenilenen ürünün birim satış fiyatı ( $\tilde{e}_i$ ), ürün kategorilerine göre ürün

ağırlıkları ( $\tilde{a}_i$ ), mağazalardan toplanan ürünlerin hasar durumlarına göre birim alış bedeli ( $\tilde{g}c_{ij}$ ), toplama merkezinden toplanan ürünlerin hasar durumlarına göre birim alış bedeli ( $\tilde{g}k_{ik}$ ), geri kazanım merkezlerindeki birim yenileme maliyeti ( $\tilde{q}r_{ijr}$ ) ve birim demontaj maliyetleri ( $\tilde{q}d_{ir}$ ) ile yenilenen ürün talebi ( $\tilde{d}r_{ci}$ ) ve yarı mamul/yararlı ürün talebi ( $\tilde{d}u_{us}$ ) değerleridir.

Buna göre; hesaplama ve kısıtlar şu şekilde değiştirilmiştir. Denklem (4.2) ve (4.5) yerine Denklem (4.31) dikkate alınarak sırası ile Denklem (4.40) ve (4.41) şeklinde yeniden yazılmıştır.

$$RI_i = \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \left( \frac{e_i^p + 2e_i^m + e_i^0}{4} \right) (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \quad \forall i \in I \quad (4.40)$$

$$CIR_i = \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \left( \frac{gc_{ij}^p + 2gc_{ij}^m + gc_{ij}^0}{4} \right) ZC_{ij}^{tr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \left( \frac{gk_{ik}^p + 2gk_{ik}^m + gk_{ik}^0}{4} \right) ZK_i^{tr} +$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} in_i ZK_i^{tr} + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \left( \frac{gr_{ijr}^p + 2gr_{ijr}^m + gr_{ijr}^0}{4} \right) (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) + \quad (4.41)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \left( \frac{qd_{ir}^p + 2qd_{ir}^m + qd_{ir}^0}{4} \right) (XC_{ij}^r + XK_{ij}^r) \quad \forall i \in I$$

Kısıt (4.8) yerine Denklem (4.38) dikkate alınarak Denklem (4.42) şeklinde yeniden yazılabilir.

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \leq \left[ (1 - \alpha) \frac{dr_{ci}^m + dr_{ci}^0}{2} + \alpha \frac{dr_{ci}^p + dr_{ci}^m}{2} \right] \quad \forall c \in C, i \in I \quad (4.42)$$

Son olarak modeldeki Kısıt (4.17), (4.18), (4.23), (4.24) ve (4.26) yerine Denklem (4.39) dikkate alınarak sırası ile Denklem (4.43), (4.44), (4.45), (4.46) ve (4.47) olarak yeniden yazılmışlardır.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XC_{ij}^r sI_{ij}^r \left[ \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left( \frac{\alpha}{2} \right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] pu_{iju} \geq XCU_u^r \quad \forall r \in R \quad \forall u \in U$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XC_{ij}^r sI_{ij}^r \left[ \left( \frac{\alpha}{2} \right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] pu_{iju} \leq XCU_u^r \quad \forall r \in R \quad \forall u \in U \quad (4.43)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X C_{ij}^r s l_{ij}^r \left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] p h_{ijh} \geq \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} X C H_h^{trl} \quad \forall r \in R \quad \forall h \in H \quad (4.44)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X C_{ij}^r s l_{ij}^r \left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] p h_{ijh} \leq \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} X C H_h^{trl} \quad \forall r \in R \quad \forall h \in H$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X K_{ij}^r s l_{ij}^r \left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] p u_{iju} \geq X K U_u^r \quad \forall r \in R \quad \forall u \in U \quad (4.45)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X K_{ij}^r s l_{ij}^r \left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] p u_{iju} \leq X K U_u^r \quad \forall r \in R \quad \forall u \in U$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X K_{ij}^r s l_{ij}^r \left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] p h_{ijh} \geq \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} X K H_h^{trl} \quad \forall r \in R \quad \forall h \in H \quad (4.46)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X K_{ij}^r s l_{ij}^r \left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] p h_{ijh} \leq \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} X K H_h^{trl} \quad \forall r \in R \quad \forall h \in H$$

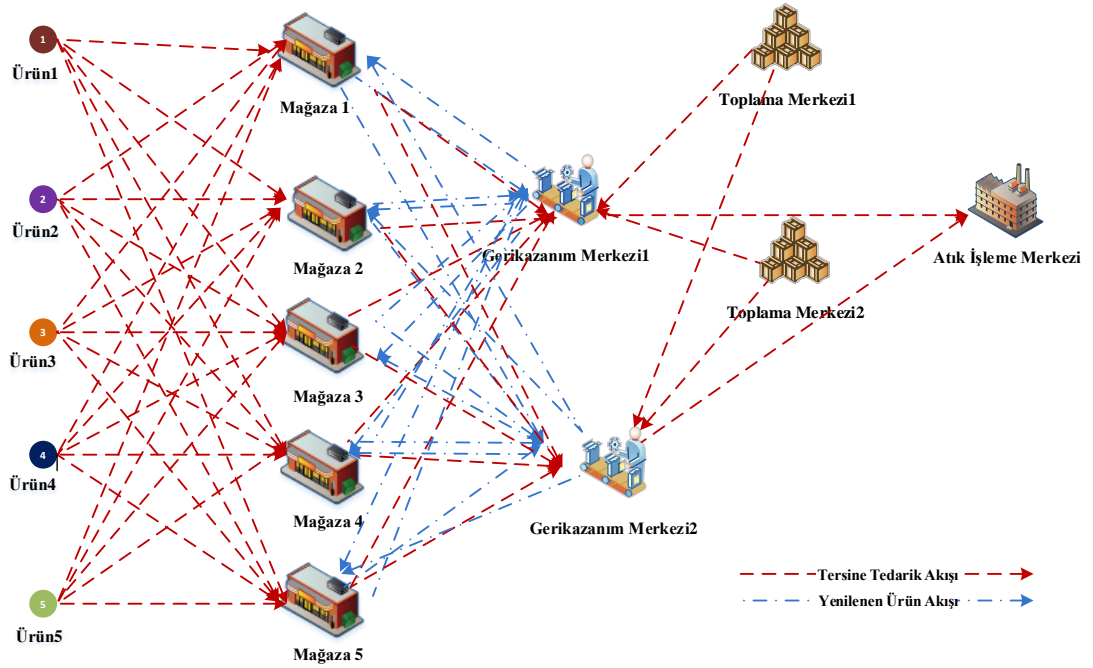
$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} X Y_u^{tsr} \geq \left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{d u_{us}^m + d u_{us}^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{d u_{us}^p + d u_{us}^m}{2} \right] \quad \forall u \in U, s \in S \quad (4.47)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} X Y_u^{tsr} \leq \left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{d u_{us}^m + d u_{us}^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{d u_{us}^p + d u_{us}^m}{2} \right] \quad \forall u \in U, s \in S$$

#### 4.4 Örnek Uygulama

Bulanık tersine tedarik zinciri modeli, hipotetik verilere dayalı sayısal örnekler içeren bir uygulama üzerinde uygulanmıştır. Ürünlerin hasar durumları ve bu hasar durumundaki ürün içerikleri ve maliyet bilgileri ile satın alma verileri gerçek yaşamdaki problemler gibi sistematik olarak yansıtılmış ve entegre edilmiştir. Ürün geri toplama işlemini toplama merkezleri ile mağazalar hasar durumuna göre farklı bedeller karşılığında toplamaktadırlar. Geri kazanım merkezleri üreticiye bağlı olup yenileme işlemi veya demontaj işlemi gerçekleştirilmektedir. Yenileme ve demontaj işlemlerinde ürün hasar durumları, kapasiteler ve talepler etkilidir. Yenilenen ürünler mağazalara geri gönderilmekte, demontaj işlemi ile elde edilen farklı yarı mamul/faydalı malzemeler talep doğrultusunda üreticiye ya da ikincil pazara ve zararlı malzemeler ise atık işleme merkezine gönderilmektedir. Uygulamada ele alınan örnek tersine tedarik zinciri ağı Şekil 4.2’de yer almaktadır. Örnek uygulamada beş farklı tip ürün, beş mağaza, iki geri kazanım merkezi, bir üretici, üç taşıyıcı, dört hasar durumu, sekiz yarı mamul/yararlı ürün, iki toplama merkezi ve bir atık işleme merkezi yer almaktadır.

Model gerçek hayatı daha iyi yansıtabilmek adına bazı parametrelerin bulanık olarak ele alınması ve modelin farklı  $\mu$  değerlerine göre sınanması ile çözülmüştür.



Şekil 4.2: Örnek uygulamadaki bulanık tersine tedarik zinciri ağ tasarımı

Uygulamada kullanılan değişken ve parametreler için kullanılan veriler gerçekçi araştırmalarla ve makale analizleri ile elde edilmiştir. Toplanan ürünlerin ağırlık ve Tablo 4.5’deki hasar durumu 1 için ağırlık yüzdeleri Polat ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmadan elde edilmiştir. Verilerle ilgili tablolar Tablo 4.1 ile Tablo 4.11 arasında gösterilmektedir. Tablolarda yer alan parametre değerlerinde maliyet, gelir, kazanç ve fiyat değerleri \$;  $i$  ürünü ile ilgili miktar, talep ve kapasite değerleri adet; ağırlık,  $u$  ve  $h$  ile ilgili miktar, talep ve kapasite değerleri kg, mesafe değerleri km, oran ve yüzde değerleri yüzde olarak dikkate alınmıştır. Tezin devam eden bölümlerinde sunulacak Model 2 ve Model 3 için örnek uygulamalardaki veri tablolarında aynı birimler kullanılmıştır.

Tablo 4.1’de yenilenen ürün satın alma bedeli ve ürün gruplarına göre ağırlıklar yer almaktadır.



**Tablo 4.1:** Ürün gruplarına göre ürün satış bedeli ve ağırlık verileri

$i$	Kriter adı	$\tilde{e}_i$	$\tilde{a}_i$
1	PC	[2,8; 3,10; 3,5]	[8,0; 9,71; 10]
2	LCD TV	[2,0; 2,30; 2,5]	[4,0; 4,62; 5,0]
3	LCD Monitör	[1,8; 2,00; 2,3]	[6,2; 7,24; 7,8]
4	CRT TV	[0,4; 0,50; 0,7]	[20; 34,27; 35]
5	CRT Monitör	[0,2; 0,25; 0,3]	[14; 16,04; 17]

Tablo 4.2’de muayene maliyetleri, taşıma maliyetleri, minimum geri dönüşüm oranları ve taşıyıcı kapasiteleri yer almaktadır. Tablodaki  $minr_i$  değeri yönetmelikte yer alan geri kazanım hedeflerine göre düzenlenmiştir.

**Tablo 4.2:** Ürün gruplarına göre veriler

$i$	$in_i$	$h_i^{t1}$	$h_i^{t2}$	$h_i^{t3}$	$minr_i$	$mins_i$	$vi_i^{t1}$	$vi_i^{t2}$	$vi_i^{t3}$
1	0,005	0,0012	0,0014	0,0017	0,75	305	300	1500	900
2	0,003	0,0006	0,0007	0,0008	0,75	350	400	2000	1200
3	0,002	0,0008	0,0010	0,0012	0,70	300	500	2500	1500
4	0,004	0,0024	0,0029	0,0034	0,75	6	320	1600	960
5	0,0025	0,0018	0,0022	0,0025	0,70	0	250	1250	750

Tablo 4.3’de yenilenen ürün talepleri ve mağaza kapasiteleri yer almaktadır.

**Tablo 4.3:**  $c$  mağazasına göre yenilenen ürün talep miktarları ve kapasiteleri

$c$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	
$\tilde{d}r_{ci}$	1	[90, 100, 110]	[140, 160, 180]	[100, 120, 140]	[3, 5, 7]	-
	2	[100, 120, 140]	[100, 120, 140]	[60, 70, 80]	-	-
	3	[80, 90, 100]	[130, 140, 150]	[110, 182, 190]	[1, 3, 5]	-
	4	[150, 180, 190]	[110, 120, 130]	[110, 120, 130]	-	[1, 3, 5]
	5	[100, 110, 120]	[90, 100, 110]	[80, 90, 100]	-	[3, 5, 7]
$ca_{ci}$	1	260	280	160	30	20
	2	220	172	160	12	10
	3	70	130	200	20	10
	4	180	160	100	45	5
	5	80	180	136	5	20

Toplama merkezlerindeki ürünlerin hasar durumu olasılık değerleri ve geri kazanım merkezlerinin verimlilik oranları Tablo 4.4’de yer almaktadır.

**Tablo 4.4:**  $j$  hasar durumundaki  $i$  ürünü için ve toplama merkezlerindeki ürünlerin kalite yüzdesi ve geri kazanım merkezi  $r$ 'deki verimlilik oranları

$i$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
1	0,05	0,10	0,25	0,60
2	0,15	0,10	0,25	0,50
$pp_{ij}$ 3	0,13	0,04	0,20	0,63
4	0,22	0,13	0,20	0,45
5	0,20	0,30	0,20	0,30
1	0,95	0,86	0,75	0,65
2	0,9	0,85	0,70	0,60
$sl_{ij}^1$ 3	0,9	0,85	0,75	0,70
4	0,85	0,82	0,75	0,60
5	0,8	0,79	0,70	0,55
1	0,95	0,90	0,77	0,66
2	0,95	0,88	0,71	0,61
$sl_{ij}^2$ 3	0,95	0,89	0,76	0,72
4	0,9	0,85	0,78	0,63
5	0,8	0,80	0,75	0,62

Tablo 4.5 hasar durumlarına göre toplanan ürünlerdeki yarı mamul ve yararlı malzeme ile zararlı malzeme miktarlarını içermektedir.

**Tablo 4.5:**  $j$  hasar durumundaki  $i$  ürününün  $u$  yarı mamul/faydalı ve  $h$  zararlı malzeme miktarları

$i$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	
$P_{iju1}$	1	0,088	0,070	0,009	0,0002
	2	0,0108	0,009	0,005	0,0002
	3	0,0108	0,009	0,005	0,0002
	4	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
$P_{iju2}$	1	0	0	0	0
	2	0,015	0,009	0,005	0,0002
	3	0,038	0,02	0,001	0,0002
	4	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
$P_{iju3}$	1	0	0	0	0
	2	0,05	0,028	0,01	0,003
	3	0,045	0,025	0,009	0,002
	4	0,038	0,01	0,008	0,001
	5	0,112	0,009	0,003	0,0001
$P_{iju4}$	1	0,035	0,02	0,002	0,001
	2	0,2316	0,1	0,009	0,006
	3	0,239	0,11	0,0092	0,0062
	4	0,15	0,09	0,005	0,0025
	5	0,169	0,095	0,0075	0,003
$P_{iju5}$	1	0,5263	0,4	0,3	0,1
	2	0,1212	0,1	0,005	0,0025
	3	0,3674	0,3	0,1	0,005
	4	0,0102	0,009	0,006	0,003
	5	0,0517	0,03	0,009	0,005
$P_{iju6}$	1	0	0	0	0
	2	0,1623	0,1	0,008	0,003
	3	0,0539	0,03	0,001	0,0009
	4	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
$P_{iju7}$	1	0,0185	0,012	0,008	0,006
	2	0,0152	0,009	0,006	0,004
	3	0,011	0,008	0,005	0,003
	4	0,0449	0,02	0,01	0,009
	5	0,0567	0,03	0,02	0,01
$P_{iju8}$	1	0	0	0	0
	2	0,1126	0,009	0,006	0,004
	3	0,076	0,06	0,04	0,003
	4	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
$P_{ijh1}$	1	0,0051	0,0070	0,0080	0,0900
	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	4	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
$P_{ijh2}$	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	4	0,0228	0,03	0,04	0,05
	5	0,5087	0,6	0,7	0,8

Tablo 4.6 yarı mamul ve yararlı malzemelere göre marjinal kazanç, satış fiyatı, yarı mamul ve yararlı malzeme talep miktarları ve taşıma maliyetlerini içermektedir.

**Tablo 4.6:**  $u$  yarı mamul/faydalı malzemeler ile ilgili veriler (marjinal kazanç, satış fiyatı, talep, taşıma maliyeti,)

$u$	$mr_u^1$	$mu_u$	$\tilde{d}_{u1}$	$h_u^{t1}$	$h_u^{t2}$	$h_u^{t3}$
1	0,034	0,0085	[9; 10;15]	0,0004	0,00048	0,00056
2	0,332	0,083	[20; 30; 40]	0,0004	0,00048	0,00056
3	0,00272	0,00068	[25; 30; 35]	0,0004	0,00048	0,00056
4	0,0016	0,0004	[50; 60; 70]	0,0004	0,00048	0,00056
5	0,00256	0,00064	[20; 30; 40]	0,0004	0,00048	0,00056
6	0,00352	0,00088	[50; 60; 70]	0,0004	0,00048	0,00056
7	0,012	0,003	[20; 30; 40]	0,0004	0,00048	0,00056
8	0,002	0,0005	[50; 60; 70]	0,0004	0,00048	0,00056

Tablo 4.7 zararlı malzemelere göre bertaraf etme ve taşıma maliyetlerini içermektedir.

**Tablo 4.7:**  $h$  zararlı malzemeler ile ilgili veriler (bertaraf, taşıma maliyeti)

$h$	$mh_h^1$	$h_h^{t1}$	$h_h^{t2}$	$h_h^{t3}$
1	0,0012	0,0004	0,0008	0,0012
2	0,00136	0,0004	0,0008	0,0012

Geri kazanım merkezlerine göre mesafeler Tablo 4.8’de yer almaktadır.

**Tablo 4.8:**  $r$  geri kazanım merkezi ile ilgili mesafe verileri

$r$	$tcr_1^r$	$tcr_2^r$	$tcr_3^r$	$tcr_4^r$	$tcr_5^r$	$tlr^{1r}$	$tsr^{1r}$
1	173	250	314	158	230	200	200
2	287	253	257	215	150	250	150

Toplama merkezlerindeki ürünler için elinde bulundurma miktarları ve birim satın alış fiyatları Tablo 4.9’da yer almaktadır.

**Tablo 4.9:**  $k$  toplama merkezindeki  $i$  ürünleri için elinde bulundurma miktarları ve birim satın alış fiyatı

$i$	$k=1$	$k=2$
1	5000	3000
2	1000	2000
3	850	1000
4	1000	1000
5	1500	1200
$\tilde{w}_i^k$		
1	[0,10; 0,15; 0,20]	[0,09; 0,11; 0,15]
2	[0,09; 0,12; 0,15]	[0,08; 0,09; 0,10]
3	[0,05; 0,06; 0,08]	[0,03; 0,40; 0,50]
4	[0,02; 0,022; 0,03]	[0,015; 0,02; 0,032]
5	[0,015; 0,022; 0,03]	[0,13; 0,02; 0,032]

Tablo 4.10 mağazalardan toplanan ürünler için satın alma bedellerini ve geri kazanım merkezlerindeki birim yenileme maliyetlerini içermektedir.

**Tablo 4.10:**  $j$  hasar durumundaki  $i$  ürünü için mağaza satın alma maliyeti ve birim yenileme maliyetleri

$i$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
1	[0,40; 0,50; 0,60]	[0,30; 0,40; 0,50]	[0,25; 0,30; 0,40]	[0,10; 0,20; 0,30]
2	[0,30; 0,40; 0,50]	[0,20; 0,30; 0,40]	[0,15; 0,22; 0,35]	[0,10; 0,14; 0,20]
3	[0,25; 0,34; 0,40]	[0,15; 0,28; 0,35]	[0,10; 0,20; 0,30]	[0,10; 0,12; 0,20]
4	[0,10; 0,20; 0,30]	[0,10; 0,16; 0,32]	[0,10; 0,12; 0,22]	[0,05; 0,08; 0,10]
5	[0,13; 0,18; 0,25]	[0,11; 0,14; 0,20]	[0,09; 0,10; 0,15]	[0,02; 0,04; 0,06]
$\tilde{g}c_{ij}$				
1	[0,20; 0,25; 0,30]	[0,40; 0,540; 0,60]	[0,80; 1,00; 1,10]	[1,00; 1,10; 1,30]
2	[0,10; 0,20; 0,30]	[0,30; 0,40; 0,50]	[0,70; 0,80; 0,90]	[0,80; 0,90; 1,00]
3	[0,10; 0,17; 0,20]	[0,20; 0,34; 0,40]	[0,55; 0,60; 0,75]	[0,65; 0,70; 0,80]
4	[0,09; 0,10; 0,20]	[0,10; 0,20; 0,30]	[0,30; 0,40; 0,50]	[0,40; 0,50; 0,70]
5	[0,10; 0,12; 0,15]	[0,10; 0,18; 0,30]	[0,40; 0,50; 0,70]	[1,00; 1,20; 2,00]
$\tilde{q}r_{ijr1}$				
1	[0,10; 0,27; 0,30]	[0,40; 0,53; 0,60]	[0,80; 0,96; 1,00]	[1,00; 1,14; 2,00]
2	[0,15; 0,19; 0,20]	[0,40; 0,50; 0,60]	[0,70; 0,75; 0,80]	[0,80; 0,89; 1,00]
3	[0,20; 0,27; 0,30]	[0,30; 0,40; 0,50]	[0,50; 0,60; 0,80]	[0,70; 0,80; 1,00]
4	[0,10; 0,12; 0,15]	[0,20; 0,29; 0,30]	[0,30; 0,43; 0,60]	[0,50; 0,54; 0,70]
5	[0,15; 0,17; 0,18]	[0,10; 0,14; 0,15]	[0,40; 0,52; 0,60]	[1,00; 1,30; 1,50]

Tablo 4.11 toplanan ürünlere göre demontaj maliyeti, ürün yenileme kapasitesi ile minimum yenileme miktarlarını göstermektedir.

**Tablo 4.11:**  $r$  geri kazanım merkezindeki  $i$  ürünleri için demontaj maliyeti, ürün yenileme kapasitesi ile minimum yenileme miktarı

$i$	$r=1$	$r=2$
1	2000	1500
2	3000	2000
$y_i^r$ 3	4000	3000
4	800	600
5	700	500
1	30	40
2	20	30
$pr_i^r$ 3	30	20
4	100	50
5	100	50
1	[0,009; 0,010; 0,020]	[0,010; 0,012; 0,017]
2	[0,008; 0,009; 0,010]	[0,009; 0,010; 0,012]
$\tilde{q}d_{ir}$ 3	[0,006; 0,007; 0,008]	[0,007; 0,008; 0,009]
4	[0,007; 0,008; 0,009]	[0,006; 0,007; 0,008]
5	[0,005; 0,006; 0,007]	[0,005; 0,006; 0,008]

Bulanık tersine tedarik zinciri ağının karma tamsayı programlama modeli, 2.694 değişken ve 347.153 kısıt içermektedir. Tüm deneyler, ILOG CPLEX 12.7.1 çözücüsü kullanılarak Intel Core i7 işlemcili 8GB Ram ve 64 bit işletim sistemli 3,40 GHz özelliklerine sahip bilgisayarda yapılmış olup çözüm üretilmiştir. Sonuç tabloları Tablo 4.12’de farklı üyelik değerleri ile sınanmıştır. Kullanılan üyelik değerleri olarak  $\mu = 0$  gerçekçi olmayan/çok düşük riskli  $\mu = 0,5$  %50 olasılıklı/orta riskli durumları ve  $\mu = 1$  tamamen gerçekçi/çok yüksek riskli çözümleri yansıtmaktadır.

**Tablo 4.12:** Performans ölçüleri

	$\mu = 0$	$\mu = 0,5$	$\mu = 1$
Toplam Kazanç*(\$)	2722,799	2561,937	2400,155
Toplam gelir*(\$)	4751,596	4472,188	4193,002
$i$ satış geliri RI*(\$)	<b>4741,650</b>	<b>4461,525</b>	<b>4181,400</b>
$u.$ satış geliri RU*(\$)	<b>9,946</b>	<b>10,663</b>	<b>11,602</b>
Toplam Maliyet*(\$)	2028,797	1910,25	1792,847
CTR*(\$)	<b>763,830</b>	<b>716,293</b>	<b>669,703</b>
CIR*(\$)	<b>1247,797</b>	<b>1175,768</b>	<b>1104,056</b>
CU*(\$)	<b>16,671</b>	<b>17,683</b>	<b>18,710</b>
CH*(\$)	0,499	0,507	0,378
Çözüm zamanı (sn)	0,62	0,47	85,14

\*x1000

Tablo 4.12'deki veriler incelendiğinde  $\mu$  değeri 1 değerine yaklaştıkça özellikle eşitlik kısıtlarında yer alan aralıklar daha sıkı olarak kontrol edilmekte ve toplam kazanç ve toplam maliyet miktarlarında azalma olduğu görülmektedir. Yenilenen ürün satışından elde edilen azalmaya karşılık yarı mamul/yararlı malzeme satışından elde edilen kazanç miktarı artmaktadır.  $\mu = 0$  değerine göre  $\mu = 1$  değerindeki RI değerinde %12 oranında azalma olur iken RU değerlerinde %16,65 oranında artış olduğu görülmektedir. Gerçekçi çözüm/çok yüksek riskli değerleri yansıtan  $\mu = 1$  değeri için talep karşılama yollarına ait veriler Tablo 4.13 ile Tablo 4.14 arasında yer almaktadır.

**Tablo 4.13:** Talep karşılama yolları  $WC_{cij}^{tr}$

$c$	$i$	$j$	$t$	$r$	Adet
1	1	1	1	1	95
1	2	1	1	1	150
1	3	1	1	1	110
2	1	1	1	1	28
2	1	1	1	2	82
2	2	1	1	2	65
3	1	1	1	2	85
3	2	1	1	2	87
3	3	1	1	1	87
4	1	1	1	1	10
4	1	1	2	1	155
4	2	1	1	1	5
4	2	1	2	1	110
4	3	1	1	1	115
5	1	1	2	2	105
5	2	1	2	2	92

**Tablo 4.14:** Talep karşılama yolları  $WK_{cij}^{tr}$

$c$	$i$	$j$	$t$	$r$	Adet
3	2	1	1	2	18
3	2	3	1	2	30
3	3	2	1	2	24
3	3	3	1	2	35
5	2	2	2	2	2
5	2	4	2	2	1
5	3	3	1	2	64
5	3	3	2	2	21

Tablo 4.13 ve 4.14 incelendiğinde yenilenen ürün taleplerinden genellikle mağazalardan toplanan hasar durumu 1 ve 2 ürünler ile karşılandığı görülmektedir. Örnek olarak mağaza 4 için ürün 2 talebinin 155 adedi mağazalardan toplanan hasar durumu 1 olan üründen taşıyıcı 2 vasıtası ile geri kazanım merkezi 1 tarafından karşılanmaktadır. Aynı zamanda mağaza 4 için toplam 395 adet yenilenen ürün talebi sadece mağazalardan toplanan hasar durumu 1 olan ürünler tarafından karşılanmaktadır.

#### **4.5 Model Sonuçları ve Modelin Çalışma Alanına Katkısı**

Çalışmada, AEEKY (2012)'de yer alan üretici sorumluluğu dikkate alınarak yönetmeliğe uyum ile birlikte gerçek hayatta ele alınması gereken bulanık tersine tedarik zinciri ağ tasarımı oluşturulmuş ve örnek bir problem üzerinden model test edilmiş ve yorumlanmıştır. Modelde istatistiki verilerin yetersizliği ve toplanan ürünün ağırlığı, fiyatlandırma gibi bazı verilerin gerçek hayattaki belirsizliği neticesinde modeli gerçek hayata benzetebilmek adına hangi parametrelerin bulanıklaştırılabileceği ya da hangi parametrelere yoğunlaşarak veri toplanması gerektiği ile ilgili konular da açıklanmaya çalışılmıştır.

Mevcut literatürden farklı olarak minimum toplama hedefi olarak genişletilmiş üretici sorumluluğu gereği özellikle üreticilerin toplama hedeflerinin dikkate alınması ile satışlar üzerinden minimum toplama miktarı dikkate alınmıştır. Ayrıca toplanan ürünlerin farklı kalite seviyelerinin modele entegrasyonunda kalite düzeyine göre ürünün hangi sürece geçmesi gerektiği bilgisinin veri olarak verilmesi yerine problemde var olan duruma göre modele bırakılmış olup ağırlık gibi daha önce dikkate alınmamış verilerin belirsizliği de dikkate alınmıştır.

Sonuç olarak modelde lojistik maliyetlerine dikkat edilmesi gerektiği ve çok yüksek riskli çözüm değerlerinde elde edilecek kazanç değerinin düştüğü görülmektedir. Benzer şekilde yenileme kararlarında hasar düzeyi 1 olan ürünlerin alış bedellerinin yüksek olmasına rağmen tercih edildiği görülmektedir. Bu sonuca göre düşük hasar durumundaki elektronik eşyaların toplanmasında eskiyi getir yeniye götür gibi kampanyaların desteklenebileceği söylenebilir. Modelde karar verici olarak tersine tedarik zinciri ağında herhangi bir büyüklükteki tek bir üretici



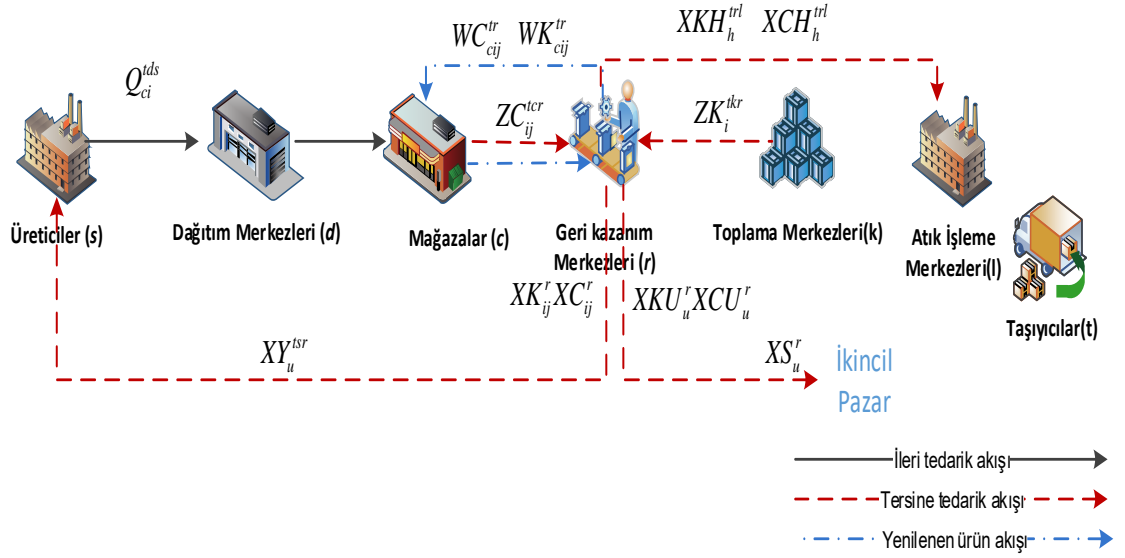
veya üretici grubu ve/veya üçüncü parti firmalar tarafından oluşturulan bir yönetim organı olabileceği gibi üretici/üretici grubu da olabilir. Karar vericiler operasyonel sorumluluklarını ve önerilen model tarafından oluşturulan optimum çözümleri bilmenin avantajına sahiptirler. Ancak modelin belli sınırları da mevcuttur ve çalışmanın sınırlarını tanımlayan bazı varsayımlar altında tasarlanmış ve hipotetik bir örnek üzerinden test edilmiştir. Model, genel üyelik değerlerine göre test edilmiş olup, gelecek çalışmalarda ara değerlere göre de test edilerek sonuçlar daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilir. Model tek bir periyot yerine çoklu periyotlar şeklinde kurgulanabilir ve karar verici olarak koordinasyon merkezinin görev ve sorumlulukları belirlenerek modele entegre edilebilir. Ayrıca model, sadece tersine tedarik zinciri olarak değil ileri tedarik zincirinin de sürece dahil edilmesi ile kapalı döngü tedarik zinciri modellenebilir. Benzer şekilde farklı minimum toplama miktarları, üretici ve/veya mağaza sayıları ile çevresel etki katsayıları vb. kriterlerin model üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi adına senaryo analizleri geliştirilebilir. Diğer bir iyileştirme olarak gerçek veriler kullanılarak gerçek bir örnekler üzerinden modeller ile çözüm sağlanabilir. Tüm bu geliştirme alanların dikkate alınması ile Model 1, Model 2 ve Model 3'ün kurgulanma süreçlerine zemin oluşturmuştur.

## 5. ÜRÜN YENİLEME SÜREÇLERİNİ İÇEREN KAPALI DÖNGÜ TEDARİK ZİNCİRİ AĞ TASARIMI (MODEL 2)

Bir önceki bölümde yer alan Model 1 e-atık için sadece tersine tedarik zinciri olarak kurgulanmış olup bu bölümde yer alan Model 2 ileri tedarik zincirinin de sürece dahil edilmesi ile kapalı döngü tedarik zinciri ağı olarak modellenmiştir. Model 2, Model 1’de yer alan örnek problem ve model yapısına ileri tedarik zincirinde yer alan aktörler ile farklı parametre ve veri setlerinin de eklenmesi ile geliştirilmiştir. Model 1’de yer alan benzer indis, parametre, karar değişkeni, hesaplama ve kısıtlar bu bölümde yeniden sunulmuştur. Amaç Model 2’nin okunurluğunun ve bölüm bütünlüğünün sağlanmasıdır. Modelde bulanıklık dikkate alınmamış olup Model 1’den farklı olarak çevresel etki kriterleri de modele entegre edilmiştir. Aynı zamanda minimum toplama miktarları, çevresel etki kriterleri ile farklı üretici ve mağaza sayılarının amaç fonksiyonuna etkileri senaryo analizleri ile test edilmiştir.

### 5.1 Modelleme Ortamı

Modelin ana yapısı Şekil 5.1’de gösterilmekte olup yönetmelik gereğince üretici sorumluluğu kapsamında üreticinin yüklenmesi gereken maliyetlerin minimizasyonunun yanı sıra üreticiye bu süreci çevresel etkileri ile birlikte etkin bir şekilde yönetmesi için gerekli karar desteğinin sağlanması amaçlanmaktadır.



Şekil 5.1: Kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı

Modelde, literatürdeki sonuçlar çerçevesinde yenilenen ürün ve yeni ürün fiyatlarındaki artışı azaltmak adına üreticiler hem üretim hem de yenileme ve demontaj/ayırma süreçlerini kendi bünyesinde yürütmektedir. Üretici ( $s$ ), satış işlemlerini farklı mağazalarda ( $c$ ) gerçekleştirmekte olup mağazalarda eskiyi getir yeniyi götür kampanyası gibi geri toplama işlemini gerçekleştirmek için toplanan ürünlerin ( $i$ ) farklı hasar durumlarına ( $j$ ) göre farklı satın alış bedelleri üzerinden yeni ürün satışı yapmaktadır. Mağazalar muayene işlemlerini kendi bünyelerinde gerçekleştirmekte olup fiyatlama yetkisine sahiptirler. Hasar durumlarına göre farklı bedellerle satın alınan kullanılmış ürünler, kampanya ve teknoloji yenileme gibi nedenlerle ürün ömrünü tamamlamadan toplanabileceği nedeni ile toplama merkezlerine göre daha pahalı fakat daha kaliteli olduklarından yenileme işleminde daha etkin olarak kullanılabilirlerdir. Geri kazanım merkezi ( $r$ ), ürünlerin muayene, yenileme ve ayrıştırma işlemlerini yürütmekte olup muayene sonrası toplanan ürünlerin hasar durumlarına göre yenileme veya yarı mamul, yararlı ve zararlı malzemelere ( $u$ ) ayrıştırma işlemlerine karar vermektedir. Geri kazanım merkezi, aynı zamanda üreticinin yeniden üretim için ihtiyaç duyduğu yarı mamul ve faydalı malzemeleri üreticilere gönderip fazla üretimi ikincil pazarda satma ve yenilenen ürünleri de mağazalarda satma işlemlerini gerçekleştirmektedir. Ürün geri toplama noktaları ( $k$ ) AEEE yönetmeliği çerçevesinde belediyeler gibi farklı kanallar tarafından yönetilmektedir. Toplama merkezlerinde toplanan atıklar belediyelerin süreçte desteklenmesi adına belli bir satın alma bedeli üzerinden yığın halinde fakat

mağazalarda toplanan ürünlere göre daha düşük kaliteli olarak satın alınmaktadır. Atık işleme merkezi ( $l$ ) doğaya zararlı olan kullanılmayacak durumdaki atıkların ( $h$ ) yakma ve gömme gibi atık bertaraf işlemlerini gerçekleştirilmektedir. Ürünlerin, atıkların ve yararlı ve zararlı malzemelerin gönderimi farklı kapasite ve farklı tipteki taşıyıcılar ( $t$ ) tarafından gerçekleştirilmektedir. Modeldeki çevresel katsayılar, e-atıkların içerdiği doğal kaynakların korunması adına değerli bileşenlerin ürün yaşam döngüsüne dahil edilmesi yanısıra çevreye zararlı maddelerin de uygun şekillerde bertarafı ile doğada atık halinde kalmaması sonucu elde edilecek kazanç değerleridir. Bu değer, üreticiler tarafından belirlenecek olup atıl olarak kullanılmayan ürünlerin sisteme dahil edilmesi sonucunda hammadde kullanımı ve işçiliğin azaltılması gibi nedenlerle elde edilen kazanç olarak ifade edilebilir. Bu kazanç aynı zamanda yönetmelikte yer alan aidatta ödül indirimi olarak da değerlendirilebilir.

Modeli gerçek hayatta var olan problemi yansıtabilmek adına bazı varsayımlarda bulunmak gerekmektedir. Buna göre modeldeki varsayımlar şunlardır:

- Tüm parametreler deterministik ve bilinmektedir.
- Mağaza, perakendeci ve geri kazanım merkezi, depo yönetim giderleri dikkate alınmamıştır.
- Her ürün için satın alma bedelleri planlanan periyotta sabittir.
- E-atık toplama maliyetlerinin toplama merkezleri ve/veya mağazalardan satın alma maliyetlerine dahil edileceği varsayılmıştır.
- Mağazalarda ürünler muayene edilerek hasar durumlarına göre ayrılmaktadır. Muayene bedeli mağazaya aittir.
- Talep fazlası üretilen tüm yarı mamul ve yararlı ürünler ikincil pazarlarda satılmaktadır.
- Yenilenemeyip kullanılmayan zararlı malzemeler atık işleme merkezlerine gönderilmektedir.
- Tek bir planlama periyodu dikkate alınmıştır.
- Tüm ürün tipi birimleri aynı kabul edilmiştir.
- Talepler bölünebilir.

## 5.2 Önerilen Matematiksel Model

Geliştirilen modelde kullanılan indisler, parametreler, karar değişkenleri ve kısıtlar aşağıda yer almaktadır.

### *İndisler ve Kümeler*

$i \in I$	Ürün grubu kümesi
$s \in S$	Üretici kümesi
$d \in D$	Dağıtım merkezi kümesi
$c \in C$	Mağaza kümesi
$t \in T$	Taşıyıcı kümesi
$r \in R$	Geri kazanım merkezi kümesi
$k \in K$	Toplama merkezi kümesi
$l \in L$	Atık işleme merkezi kümesi
$h \in H$	Zararlı malzeme kümesi
$u \in U$	Yarı mamul/yararlı malzeme kümesi
$j \in J$	Hasar durumu kümesi

### *Parametreler*

$e_i$	Yenilenebilir ürün $i$ için birim satış fiyatı
$b_i$	Yeni ürün $i$ birim satış fiyatı
$in_i$	Ürün $i$ için birim muayene maliyeti
$a_i$	Ürün $i$ 'nin birim ağırlığı
$gc_{ij}$	Toplanan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünün mağazadan birim satın alış fiyatı
$gk_i^k$	Toplanan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünün toplama merkezi $k$ 'dan birim satın alış fiyatı
$w_i^k$	Toplama merkezi $k$ 'nın elinde bulundurduğu $i$ ürün miktarı
$pc_i^s$	Üretici $s$ 'nin ürün $i$ için birim üretim maliyeti
$qr_{ij}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $j$ hasar durumundaki $i$ ürünün birim yenileme maliyeti
$qd_i^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $i$ ürünün birim demontaj maliyeti (sökme, parçalama içinde)
$h_i^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $i$ ürünü için birim taşıma maliyeti

$h_h^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $h$ zararlı malzeme için birim taşıma maliyeti
$h_u^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $u$ yarı mamul/yararlı malzeme için birim taşıma maliyeti
$k^d$	Dağıtım merkezi $d$ 'nin birim depolama maliyeti
$pp_{ij}$	Toplama merkezlerindeki $i$ ürününün $j$ hasar durumu yüzdesi
$pu_{iju}$	$j$ hasar durumundaki $i$ ürün için $u$ yarı mamul/yararlı malzeme ağırlık yüzdesi
$ph_{ijh}$	$j$ hasar durumundaki $i$ ürün için $h$ zararlı malzeme ağırlık yüzdesi
$mr_u^s$	Üretici $s$ 'nin $u$ yarı mamul/yararlı malzemenin marjinal kazanç değeri
$mh_h^l$	Atık işleme merkezi $l$ 'nin $h$ zararlı malzeme için birim bertaraf maliyeti
$mu_u$	$u$ yarı mamul/yararlı malzemenin birim satış fiyatı
$minr_i$	Ürün $i$ için minimum geri kazanım oranı
$mins_i$	Ürün $i$ için minimum toplama miktarı
$sl_{ij}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü için demontaj verimlilik oranı
$y_i^s$	Üretici $s$ 'in ürün $i$ için üretim kapasitesi
$y_i^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $i$ ürünü için yenileme kapasitesi
$z^d$	Dağıtım merkezi $d$ 'nin depolama kapasitesi
$vl_i^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $i$ ürünü için taşıma kapasitesi
$vh_h^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $h$ zararlı malzeme için taşıma kapasitesi
$vu_u^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $u$ yarı mamul/yararlı malzeme için taşıma kapasitesi
$tdc_c^d$	Mağaza $c$ ve dağıtım merkezi $d$ arasındaki mesafe
$tsd^{ds}$	Dağıtım merkezi $d$ ile üretici $s$ arasındaki mesafe
$tcr_c^r$	Mağaza $c$ ile geri kazanım merkezi $r$ arasındaki mesafe
$tkr^{kr}$	Toplama merkezi $k$ ile geri kazanım merkezi $r$ arasındaki mesafe
$tlr^{lr}$	Atık işleme merkezi $l$ ile geri kazanım merkezi $r$ arasındaki mesafe
$tsr^{sr}$	Üretici $s$ ile geri kazanım merkezi $r$ arasındaki mesafe
$de_{ci}$	Mağaza $c$ 'nin $i$ yeni ürün talebi

$dr_{ci}$	Mağaza $c$ 'nin $i$ yenilenen ürün talebi
$du_u^s$	Üretici $s$ 'nin $u$ yarı mamul/yararlı ürün talebi
$ps_i^s$	Üretici $s$ 'nin ürün $i$ için minimum üretim miktarı
$pr_i^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin ürün $i$ için minimum yenileme miktarı
$ca_{ic}$	Mağaza $c$ 'nin ürün $i$ için toplama kapasitesi
$Ed_i$	Demontaj edilen $i$ için çevresel etki kazanç katsayısı
$Er_i$	Yenilenen ürün $i$ için çevresel etki kazanç katsayısı
$En_u$	$u$ yarı mamul/yararlı ürün için çevresel etki kazanç katsayısı
$Co_i^t$	Yeni ürün veya yenilenen $i$ için taşımadan kaynaklı CO <sub>2</sub> emisyonu ceza katsayısı
$Co_u^t$	$u$ yarı mamul/yararlı ürün için taşımadan kaynaklı CO <sub>2</sub> emisyonu ceza katsayısı
$Co_h^t$	$h$ zararlı malzemeler için taşımadan kaynaklı CO <sub>2</sub> emisyonu ceza katsayısı

#### **Karar Değişkenleri**

$Q_{ci}^{tds}$	Mağaza $c$ 'nin üretici $s$ 'den $d$ dağıtım merkezi ve $t$ taşıyıcısı ile karşılanan $i$ ürün talep miktarı
$WC_{cij}^{tr}$	Mağaza $c$ 'nin geri kazanım merkezi $r$ 'den mağazalardan toplanan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü kullanılarak $t$ taşıyıcısı ile karşılanan $i$ yenilenen ürün talep miktarı
$WK_{cij}^{tr}$	Mağaza $c$ 'nin geri kazanım merkezi $r$ 'den toplama merkezlerinden toplanan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü kullanılarak $t$ taşıyıcısı ile karşılanan $i$ yenilenen ürün talep miktarı
$ZK_i^{tkr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin toplama merkezi $k$ 'den $t$ taşıyıcı kanalı ile satın aldığı $i$ ürün miktarı
$ZC_{ij}^{tcr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin mağaza $c$ 'den $t$ taşıyıcı kanalı ile satın aldığı $j$ hasar durumundaki $i$ ürün miktarı
$XC_{ij}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin mağazalardan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü alarak karşıladığı demontaj miktarı
$XK_{ij}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin toplama merkezlerinden $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü alarak karşıladığı demontaj miktarı
$XKU_u^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $t$ taşıyıcı aracılığı ile toplama merkezlerinden alınan ürünlerden elde ettiği $u$ yarı mamul/yararlı malzeme miktarı
$XCU_u^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $t$ taşıyıcı aracılığı ile mağazalardan alınan ürünlerden elde ettiği $u$ yarı mamul/yararlı malzeme miktarı
$XKH_h^{trl}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin atık işleme merkezi $l$ 'ye $t$ taşıyıcı aracılığı ile toplama merkezlerinden alınan ürünlerden elde ettiği $h$ zararlı malzeme gönderim miktarı

$XCH_h^{tr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin atık işleme merkezi $l$ 'ye mağaza $c$ 'den $t$ taşıyıcı aracılığı ile $j$ hasar durumundaki $i$ üründen elde ettiği $h$ zararlı malzeme gönderim miktarı
$XY_u^{tsr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'den üretici $s$ 'nin $t$ taşıyıcı aracılığı ile karşılanan $u$ yarı mamul/yararlı malzeme talep miktarı
$XS_u^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'den ikincil pazarlara satılan $u$ yarı mamul/yararlı malzeme miktarı
$YS_{ci}^{tds}$	1: mağaza $c$ 'nin $i$ ürün talebi üretici $s$ 'den $d$ dağıtım merkezi ve $t$ taşıyıcısı yolu ile karşılanıyorsa; 0: diğer durumlarda.
$YR_{cij}^{tr}$	1: mağaza $c$ 'nin $j$ hasar durumundaki $i$ yenilenen ürün talebi geri kazanım merkezi $r$ 'den $t$ taşıyıcısı yolu ile karşılanması durumunda; 0 diğer durumlarda.
$RI_i$	Yenilenen ürün $i$ satışından elde edilen toplam gelir
$RU_u$	$u$ yarı mamul/yararlı ürün satışından elde edilen toplam gelir ( <i>marjinal gelir+satış geliri</i> )
$CIF_i$	Yeni ürün $i$ için ileri tedarik zinciri maliyeti ( <i>üretim+depolama maliyeti</i> )
$CTF_i$	Yeni ürün $i$ için ileri lojistik maliyeti ( <i>taşıma maliyeti</i> )
$CTR_i$	Kullanılmış/kullanım ömrü dolmuş ve yenilenen ürün $i$ için tersine lojistik maliyeti ( <i>taşıma maliyeti</i> )
$CIR_i$	Kullanılmış/kullanım ömrü dolmuş ve yenilenen ürün $i$ için tersine tedarik zinciri maliyeti ( <i>satın alma+muayene+yenileme+demontaj maliyeti</i> )
$CU_u$	$u$ yarı mamul/yararlı ürün için toplam maliyet ( <i>taşıma maliyeti</i> )
$CH_h$	$h$ zararlı malzemeler için toplam maliyet ( <i>atık bertaraf+taşıma maliyeti</i> )
$ED_i$	Geri kazanım merkezinde işlenen yenilenen veya demontaj edilen ürün $i$ için toplam çevresel kazanç
$EN_u$	$u$ yarı mamul/yararlı ürün için toplam çevresel kazanç
$CO_i$	Ürün $i$ için taşımadan kaynaklı toplam CO <sub>2</sub> emisyon ceza maliyeti
$CO_u$	$u$ yarı mamul/yararlı ürün için taşımadan kaynaklı toplam CO <sub>2</sub> emisyon ceza maliyeti
$CO_h$	$h$ zararlı malzemeler için taşımadan kaynaklı toplam CO <sub>2</sub> emisyon ceza maliyeti

#### **Karma Tamsayı Programlama Modeli**

$$\begin{aligned}
\text{maximize} \quad & \sum_{i \in I} (ED_i + RI_i - CIF_i - CTF_i - CTR_i - CIR_i - CO_i) + \\
& \sum_{u \in U} (EN_u + RU_u - CU_u - CO_u) - \sum_{h \in H} (CH_h + CO_h)
\end{aligned} \tag{5.1}$$

#### **Hesaplamalar**

$$RI_i = \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} b_i Q_{ci}^{tds} + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} e_i (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \quad \forall i \in I \tag{5.2}$$



$$RU_u = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} mr_u^s XY_u^{tsr} + \sum_{r \in R} mu_u XS_u^r \quad \forall u \in U \quad (5.3)$$

$$CIF_i = \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} pc_i^s Q_{ci}^{tds} + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} k^d a_i Q_{ci}^{tds} \quad \forall i \in I \quad (5.4)$$

$$CTF_i = \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} h_i^t tsd^{ds} Q_{ci}^{tds} + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} h_i^t tdc_c^d Q_{ci}^{tds} \quad \forall i \in I \quad (5.5)$$

$$CTR_i = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} h_i^t tkr^{kr} ZK_i^{tkr} + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} h_i^t tcr^{cr} (ZC_{ij}^{tcr} + WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \quad \forall i \in I \quad (5.6)$$

$$CIR_i = \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} gc_{ij} ZC_{ij}^{tcr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} gk_i^k ZK_i^{tkr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} in_i ZK_i^{tkr} \\ + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} qr_{ij}^r (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) + \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} qd_i^r (XC_{ij}^r + XK_{ij}^r) \quad \forall i \in I \quad (5.7)$$

$$CU_u = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} tsr^{sr} h_u^t XY_u^{tsr} \quad \forall u \in U \quad (5.8)$$

$$CH_h = \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} h_h^t tlr^{lr} (XCH_h^{trl} + XKH_h^{trl}) + \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} mh_h^l (XCH_h^{trl} + XKH_h^{trl}) \quad \forall h \in H \quad (5.9)$$

$$ED_i = \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} Ed_i (XC_{ij}^r + XK_{ij}^r) + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} Er_i (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \quad \forall i \in I \quad (5.10)$$

$$EN_u = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} En_u XY_u^{tsr} \quad \forall u \in U \quad (5.11)$$

$$CO_i = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} Co_i^t h_i^t tkr^{kr} ZK_i^{tkr} + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} Co_i^t h_i^t tcr^{cr} (ZC_{ij}^{tcr} + WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) + \\ \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} Co_i^t h_i^t tsd^{ds} Q_{ci}^{tds} + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} Co_i^t h_i^t tdc_c^d Q_{ci}^{tds} \quad \forall i \in I \quad (5.12)$$

$$CO_u = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} Co_u^t tsr^{sr} h_u^t XY_u^{tsr} \quad \forall u \in U \quad (5.13)$$

$$CO_h = \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} Co_h^t h_h^t tlr^{lr} (XCH_h^{trl} + XKH_h^{trl}) \quad \forall h \in H \quad (5.14)$$

### Kısıtlar

$$\sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} Q_{ci}^{tds} = de_{ci} \quad \forall c \in C, i \in I \quad (5.15)$$

$$Q_{ci}^{tds} \geq YS_{ci}^{tds} \quad \forall c \in C, i \in I, t \in T, d \in D, s \in S \quad (5.16)$$

$$Q_{ci}^{tds} \leq YS_{ci}^{tds} M \quad \forall c \in C, i \in I, t \in T, d \in D, s \in S \quad (5.17)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \leq dr_{ci} \quad \forall c \in C, i \in I \quad (5.18)$$

$$WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr} \geq YR_{cij}^{tr} \quad \forall t \in T, r \in R, c \in C, i \in I, j \in J \quad (5.19)$$

$$WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr} \leq M \cdot YR_{cij}^{tr} \quad \forall t \in T, r \in R, c \in C, i \in I, j \in J \quad (5.20)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} Q_{ci}^{tds} \leq y_i^s \quad \forall s \in S, i \in I \quad (5.21)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} a_i Q_{ci}^{tds} \leq z^d \quad \forall d \in D \quad (5.22)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \leq y_i^r \quad \forall r \in R, i \in I \quad (5.23)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} ZC_{ij}^{tcr} \leq ca_{ci} \quad \forall c \in C, i \in I \quad (5.24)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} Q_{ci}^{tds} + \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \leq v_i^t \quad \forall t \in T, i \in I \quad (5.25)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{r \in R} XY_u^{tsr} \leq v u_u^t \quad \forall t \in T, u \in U \quad (5.26)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} ZK_i^{tkr} \leq w_i^k \quad \forall i \in I, k \in K \quad (5.27)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} ZK_i^{tkr} + \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} ZC_{ij}^{tcr} \geq \text{mins}_i \quad \forall i \in I \quad (5.28)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} Q_{ci}^{tds} - \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} p s_i^s Y S_{ci}^{tds} \geq 0 \quad \forall i \in I, s \in S \quad (5.29)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) - \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} p r_i^r Y R_{cij}^{tr} \geq 0 \quad \forall i \in I, r \in R \quad (5.30)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{c \in C} ZC_{ij}^{tcr} = \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} WC_{cij}^{tr} + XC_{ij}^r \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \quad (5.31)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XC_{ij}^r s l_{ij}^r a_i p u_{iju} = X C U_u^r \quad \forall r \in R \quad \forall u \in U \quad (5.32)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X C_{ij}^r s l_{ij}^r a_i p h_{ijh} = \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} X C H_h^{trl} \quad \forall r \in R \quad \forall h \in H \quad (5.33)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} p p_{ij} ZK_i^{tkr} = \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} W K_{cij}^{tr} + X K_{ij}^r \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \quad (5.34)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X K_{ij}^r s l_{ij}^r a_i p u_{iju} = X K U_u^r \quad \forall r \in R \quad \forall u \in U \quad (5.35)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X K_{ij}^r s l_{ij}^r a_i p h_{ijh} = \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} X K H_h^{trl} \quad \forall r \in R \quad \forall h \in H \quad (5.36)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{s \in S} X Y_u^{tsr} + X S_u^r = X C U_u^r + X K U_u^r \quad \forall u \in U, r \in R \quad (5.37)$$

$$d u_u^s = \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} X Y_u^{tsr} \quad \forall u \in U, s \in S \quad (5.38)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{r \in R} (X K H_h^{trl} + X C H_h^{trl}) \leq v h_h^t \quad \forall t \in T, h \in H \quad (5.39)$$

$$\left( \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} (XK_{ij}^r + XK_{ij}^r) + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) \right) \geq \quad (5.40)$$

$$\left( \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} ZC_{ij}^{tcr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} ZK_i^{tkr} \right) \min r_i \quad \forall i \in I$$

$$\begin{aligned} & WC_{cij}^{tr}, WK_{cij}^{tr}, ZK_i^{tkr}, ZC_{ij}^{tcr}, XK_{ij}^r, XK_{ij}^r, Q_{ci}^{tds}, XKU_u^r, XCU_u^r, XKH_h^{trl}, XCH_h^{trl}, XY_u^{tsr}, XS_u^r, \\ & ED_i, EN_u, CO_i, CO_u, CO_h \geq 0 \\ & YR_{cij}^{tr}, YS_{ci}^{tds} \in [0,1] \quad \forall c \in C, i \in I, j \in J, k \in K, t \in T, d \in D, s \in S, r \in R, u \in U, h \in H, l \in L \end{aligned} \quad (5.41)$$

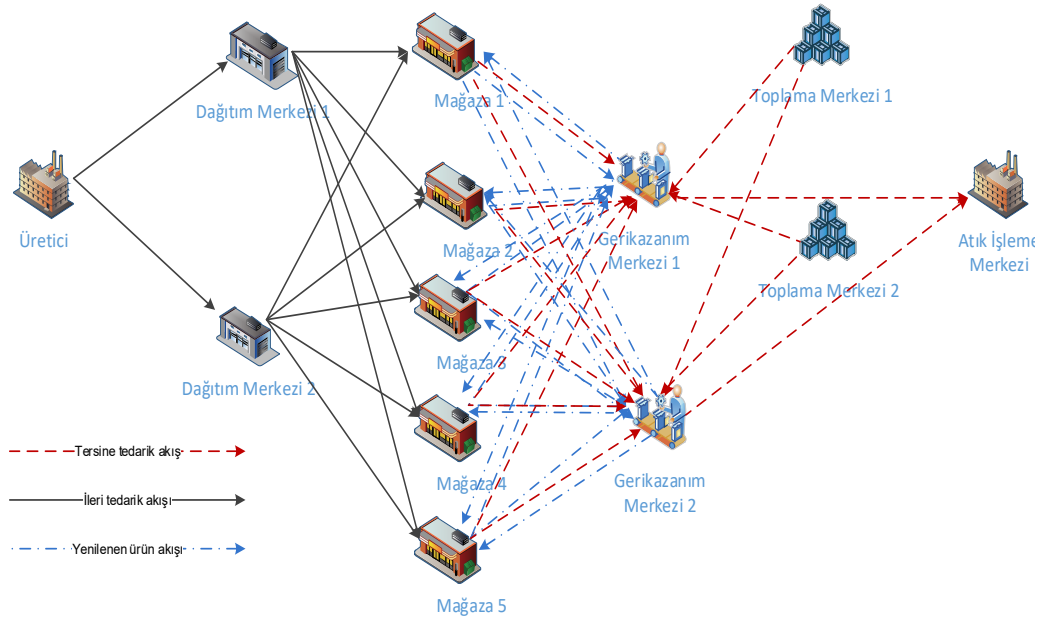
Amaç fonksiyonu (5.1), kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımında gelir elde edilen ürün grubu satışı, yarı mamul veya yararlı malzeme satışlarından ve çevresel kazançlardan toplanan ve satışı yapılan ürün gruplarına göre muayene, parçalama, yenileme ve taşıma maliyetleri ile zararlı malzemelerin taşınması ve yok edilmesi için gerekli maliyetler ile CO<sub>2</sub> emisyon ceza değerlerinin çıkarılması ile bulunan toplam kazancın maksimizasyonudur. Denklem (5.2), birinci kalite ve yenilenen ürün satışlarından elde edilen toplam geliri hesaplar. Denklem (5.3), üretilen yararlı malzemelerin satışından elde edilen geliri hesaplar. Denklem (5.4), yeni ürün üretim, depolama maliyetlerini hesaplar. Denklem (5.5), ileri lojistik maliyetlerini tanımlar. Denklem (5.6), tersine lojistik maliyetleri olan toplama merkezi ve mağazalarda toplanan kullanılmış ve ya atık ürünlerle, yenilenen ürünlerin taşıma maliyetini tanımlar. Denklem (5.7), tersine maliyetlerden toplama merkezi ve mağazalarda toplanan kullanılmış ve ya atık ürünlerle, yenilenen ürünlerin satın alma, muayene, yenileme ve parçalama maliyetlerini tanımlar. Denklem (5.8), üretilen yarı mamul ve yararlı malzemelerin üreticilere gönderme maliyetlerini hesaplar. Denklem (5.9), üretilen zararlı malzemelerin yok etme ve taşıma maliyetlerini hesaplar. Denklem (5.10), geri kazanım merkezlerinde işlenen yenilenen veya demontaj edilen ürünler için toplam çevresel kazanç ödülünü hesaplar. Denklem (5.11), dönüştürülen yarı mamul/yararlı ürünlerin kullanımı ile elde edilen toplam çevresel kazanç ödülünü hesaplar. Denklem (5.12), (5.13) ve (5.14) sırası ile yeni, yenilenen ve toplanan ürünlerin taşınması, yarı mamul/yararlı ürün taşınması ve zararlı malzeme taşınması sonucu elde edilen CO<sub>2</sub> emisyon ceza maliyetini hesaplar. Denklem (5.15), (5.16), (5.17) birinci kalite ürün üretim ve talep kısıtlarıdır ve (5.18), (5.19), (5.20) yenilenen ürün üretim ve talep kısıtlarıdır. Denklem (5.21), (5.22), (5.23) sırasıyla üretici, dağıtım merkezleri, geri kazanım merkezlerinin kapasite kısıtlarıdır. Denklem (5.24),

mağazaların kullanılmış ürün toplama kapasite kısıtıdır. Denklem (5.25), taşıyıcıların birinci kalite ve yenilenen ürün kapasite kısıtlarıdır. Kısıt (5.26), taşıyıcıların yarı mamul ve yararlı malzemeler için kapasite kısıtıdır. Kısıt (5.27), toplama merkezlerindeki ürün dengesini tanımlar. Kısıt (5.28), üreticilerin ürün gruplarına göre minimum geri toplama hedeflerini tanımlar. Kısıt (5.29), her üreticinin bir üründen minimum kabul edilebilir üretim miktarlarını tanımlar. Kısıt (5.30), geri kazanım merkezlerinin bir üründen minimum kabul edilebilir yenileme miktarlarını tanımlar. Kısıt (5.31) mağazalardan alınan kullanılmış ve ya atık ürünlerin ürün dengesini tanımlar. Denklem (5.32), (5.33) geri kazanım merkezlerindeki mağazalardan alınan kullanılmış ürün gruplarına göre yarı mamul veya yararlı malzeme ve zararlı malzeme dönüşüm değerlerini tanımlar. Kısıt (5.34) toplama merkezlerinden alınan kullanılmış ve ya atık ürünlerin ürün dengesini tanımlar. Kısıt (5.35), (5.36) geri kazanım merkezlerindeki ürün gruplarına göre yarı mamul veya yararlı malzeme ve zararlı malzeme dönüşüm değerlerini tanımlar. Kısıt (5.37) ve (5.38) üreticilerin yarı mamul veya yararlı malzeme ürün dönüşüm dengesi ve talep kısıtlarıdır. Kısıt (5.39) taşıyıcıların zararlı malzemeler için kapasite kısıtıdır. Kısıt (5.40), ürün gruplarına göre minimum geri dönüşüm kısıtını tanımlar. Son olarak kısıt (5.41) değişkenlerin doğasını tanımlar.

### 5.3 Örnek Uygulama

Bu bölümde, önerilen modelin sayısal sonuçları, problemin varlığını kanıtlamak adına oluşturulmuş bir örnek model için sunulmuştur. Bu nedenle ürünlerin hasar durumları ve bu hasar durumundaki ürün içerikleri ve maliyet bilgileri ile satın alma verileri çalışmada gerçek yaşamdaki problemler gibi sistematik olarak yansıtılmış ve entegre edilmiştir. Yetkilendirilmiş kuruluşu olmayan bağımsız üreticili bir sistem için model çözülmüştür. Örnek ağ, ileri tedarik zinciri kanalında beş tip ürün satan, beş müşteri mağazasından meydana gelmektedir. Bu ürünler, tek üreticiden iki dağıtım merkezi ve tek taşıyıcı ile tedarik edilebilmektedir. Tersine tedarik zinciri ağında iki geri kazanım merkezi, bir atık işleme merkezi ve iki toplama merkezinden oluşmaktadır. Ürün geri toplama işlemini toplama merkezlerinin yanı sıra mağazalar da dört farklı hasar durumuna göre farklı bedeller karşılığında müşterilerden toplamaktadırlar. Geri kazanım merkezleri üreticiye bağlı olup yenileme işlemi veya

demontaj işlemini gerçekleştirmektedir. Yenileme ve demontaj işlemlerinde ürün hasar durumları, kapasiteler ve talepler etkilidir. Yenilenen ürünler mağazalara geri gönderilmekte, demontaj işlemi ile elde edilen sekiz farklı yarı mamul/faydalı malzemeler talep doğrultusunda üreticiye yada ikincil pazara ve iki farklı zararlı malzeme ise atık işleme merkezine gönderilmektedir. Uygulamada taşıma kapasiteleri dikkate alınmış olup farklı CO<sub>2</sub> emission ceza katsayılarına sahip üç farklı taşıyıcı tipi yer almaktadır. Şekil 5.2’de ilgili örnek kapalı döngü tedarik zinciri ağı gösterilmektedir.



Şekil 5.2: Örnek uygulamadaki kapalı döngü tedarik zinciri ağı

Uygulamada kullanılan değişken ve parametreler ile ilgili tablolar Tablo 5.1 ile Tablo 5.12 arasında gösterilmektedir. Tablo 5.1’de yer alan  $mins_i$  ve  $minr_i$  değeri yönetmelikte yer alan geri kazanım hedeflerine göre düzenlenmiştir. Minimum toplama miktarı toplam yeni ve yenilenen ürün talebinin %65’i olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 5.1:** Ürün gruplarına göre veriler

$i$ Kriter adı	$e_i$	$b_i$	$in_i$	$a_i$	$minr_i$	$mins_i$	$pc_i^l$	$y_i^r$	$ps_i^l$	$h_i^{r1}$	$h_i^{r2}$	$h_i^{r3}$
1 PC	3,1	4	0,005	9,71	0,75	1238	0,50	3000	20	0,0012	0,0014	0,001
2 LCD TV	2,3	2,6	0,003	4,62	0,75	1261	0,40	2000	30	0,0006	0,0007	0,000
3 LCD Monitör	2,0	2,5	0,002	7,24	0,70	1238	0,34	1900	30	0,0008	0,0010	0,001
4 CRT TV	0,5	2	0,004	34,2	0,75	14	0,20	500	1	0,0024	0,0029	0,003
5 CRT Monitör	0,2	2,10	0,0025	16,0	0,70	0	0,18	100	0	0,0018	0,0022	0,002

**Tablo 5.2:**  $j$  hasar durumundaki  $i$  ürünü için mağaza satın alma maliyeti ve toplama merkezlerindeki ürünlerin kalite yüzdesi

$i$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	
$gc_{ij}$	1	0,50	0,40	0,30	0,20
	2	0,40	0,30	0,22	0,14
	3	0,34	0,28	0,20	0,12
	4	0,20	0,16	0,12	0,08
	5	0,18	0,14	0,10	0,04
$pp_{ij}$	1	0,05	0,10	0,25	0,60
	2	0,15	0,10	0,25	0,50
	3	0,13	0,04	0,20	0,63
	4	0,22	0,13	0,20	0,45
	5	0,20	0,30	0,20	0,30

**Tablo 5.3:**  $j$  hasar durumundaki  $i$  ürünü için geri kazanım merkezi  $r$ 'deki veriler (birim yenileme maliyetleri, verimlilik oranları)

$i$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	
$qr_{ij}^{r1}$	1	0,25	0,50	1,00	1,10
	2	0,20	0,40	0,80	0,90
	3	0,17	0,34	0,60	0,70
	4	0,10	0,20	0,40	0,50
	5	0,12	0,18	0,5	1,2
$qr_{ij}^{r2}$	1	0,27	0,53	0,96	1,14
	2	0,19	0,50	0,75	0,89
	3	0,27	0,40	0,60	0,80
	4	0,12	0,29	0,43	0,54
	5	0,17	0,14	0,52	1,3
$sl_{ij}^{r1}$	1	0,95	0,86	0,75	0,65
	2	0,9	0,85	0,70	0,60
	3	0,9	0,85	0,75	0,70
	4	0,85	0,82	0,75	0,60
	5	0,8	0,79	0,70	0,55
$sl_{ij}^{r2}$	1	0,95	0,90	0,77	0,66
	2	0,95	0,88	0,71	0,61
	3	0,95	0,89	0,76	0,72
	4	0,9	0,85	0,78	0,63
	5	0,8	0,80	0,75	0,62

**Tablo 5.4:**  $c$  mağazasına göre  $i$  yeni/yenilenen ürün talep miktarları ve kapasiteleri

$c$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	
$de_{ci}$	1	300	400	300	10	0
	2	200	400	300	4	0
	3	360	100	200	2	0
	4	240	200	250	0	0
	5	200	200	160	0	0
$dr_{ci}$	1	100	160	124	4	0
	2	120	120	70	0	0
	3	90	140	92	2	0
	4	180	120	118	0	0
	5	114	100	90	0	0
$ca_{ci}$	1	260	280	160	30	20
	2	220	172	160	12	10
	3	70	130	200	20	10
	4	180	160	100	45	5
	5	80	180	136	5	20

**Tablo 5.5:**  $r$  geri kazanım merkezindeki  $i$  ürünleri için demontaj maliyeti ve ürün yenileme kapasitesi ile minimum yenileme miktarı

$i$	$r=1$	$r=2$	
$qd_i^r$	1	0,010	0,012
	2	0,009	0,010
	3	0,007	0,008
	4	0,008	0,007
	5	0,006	0,006
$y_i^r$	1	2000	1500
	2	3000	2000
	3	4000	3000
	4	800	600
	5	700	500
$pr_i^r$	1	30	40
	2	20	30
	3	30	20
	4	100	50
	5	100	50

**Tablo 5.6:**  $j$  hasar durumundaki  $i$  ürünü için  $u$  yarı mamul/faydalı ve  $h$  zararlı malzeme miktarları

$i$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	
$P_{iju1}$	1	0,088	0,070	0,009	0,0002
	2	0,0108	0,009	0,005	0,0002
	3	0,0108	0,009	0,005	0,0002
	4	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
$P_{iju2}$	1	0	0	0	0
	2	0,015	0,009	0,005	0,0002
	3	0,038	0,02	0,001	0,0002
	4	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
$P_{iju3}$	1	0	0	0	0
	2	0,05	0,028	0,01	0,003
	3	0,045	0,025	0,009	0,002
	4	0,038	0,01	0,008	0,001
	5	0,112	0,009	0,003	0,0001
$P_{iju4}$	1	0,035	0,02	0,002	0,001
	2	0,2316	0,1	0,009	0,006
	3	0,239	0,11	0,0092	0,0062
	4	0,15	0,09	0,005	0,0025
	5	0,169	0,095	0,0075	0,003
$P_{iju5}$	1	0,5263	0,4	0,3	0,1
	2	0,1212	0,1	0,005	0,0025
	3	0,3674	0,3	0,1	0,005
	4	0,0102	0,009	0,006	0,003
	5	0,0517	0,03	0,009	0,005
$P_{iju6}$	1	0	0	0	0
	2	0,1623	0,1	0,008	0,003
	3	0,0539	0,03	0,001	0,0009
	4	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
$P_{iju7}$	1	0,0185	0,012	0,008	0,006
	2	0,0152	0,009	0,006	0,004
	3	0,011	0,008	0,005	0,003
	4	0,0449	0,02	0,01	0,009
	5	0,0567	0,03	0,02	0,01
$P_{iju8}$	1	0	0	0	0
	2	0,1126	0,009	0,006	0,004
	3	0,076	0,06	0,04	0,003
	4	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
$P_{ijh1}$	1	0,0051	0,0070	0,0080	0,0900
	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	4	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
$P_{ijh2}$	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	4	0,0228	0,03	0,04	0,05
	5	0,5087	0,6	0,7	0,8



**Tablo 5.7:**  $u$  yarı mamul/faydalı malzemeler ile ilgili veriler (marjinal kazanç, taşıma maliyeti, satış fiyatı, talep, çevresel etki katsayısı ve taşıyıcılara göre CO<sub>2</sub> emisyon ceza katsayıları)

$u$	$mr_u^l$	$mu_u$	$du_u^l$	$h_u^{t1}$	$h_u^{t2}$	$h_u^{t3}$	$En_u$	$Co_u^{t1}$	$Co_u^{t2}$	$Co_u^{t3}$
1	0,034	0,0085	10	0,0004	0,00048	0,00056	0,001	0,0001	0,00009	0,00008
2	0,332	0,083	30	0,0004	0,00048	0,00056	0,003	0,0003	0,0002	0,0001
3	0,00272	0,00068	30	0,0004	0,00048	0,00056	0,0012	0,00012	0,00011	0,0001
4	0,0016	0,0004	60	0,0004	0,00048	0,00056	0,0001	0,00001	0,000009	0,000008
5	0,00256	0,00064	30	0,0004	0,00048	0,00056	0,00001	0,000001	0,0000009	0,0000008
6	0,00352	0,00088	60	0,0004	0,00048	0,00056	0,00015	0,000015	0,000014	0,000013
7	0,012	0,003	30	0,0004	0,00048	0,00056	0,0002	0,00002	0,00001	0,000009
8	0,002	0,0005	60	0,0004	0,00048	0,00056	0,00011	0,000011	0,000009	0,000008

**Tablo 5.8:**  $h$  zararlı malzemeler ile ilgili veriler (bertaraf, taşıma maliyeti, CO<sub>2</sub> emisyon ceza katsayıları)

$h$	$mh_h^l$	$h_h^{t1}$	$h_h^{t2}$	$h_h^{t3}$	$Co_h^{t1}$	$Co_h^{t2}$	$Co_h^{t3}$
1	0,0012	0,0004	0,0008	0,0012	0,0009	0,0007	0,0006
2	0,00136	0,0004	0,0008	0,0012	0,001	0,0008	0,0007

**Tablo 5.9:**  $d$  dağıtım merkezi ile ilgili veriler (depolama maliyeti, kapasite, mesafe)

$d$	$k^d$	$z^d$	$tsd^{d1}$	$tdc_1^d$	$tdc_2^d$	$tdc_3^d$	$tdc_4^d$	$tdc_5^d$
1	0,00018	4000	173	318	222	300	320	182
2	0,00016	3000	287	66	250	200	320	136

**Tablo 5.10:**  $r$  geri kazanım merkezi ile ilgili mesafe verileri

$r$	$tcr_1^r$	$tcr_2^r$	$tcr_3^r$	$tcr_4^r$	$tcr_5^r$	$tlr^{lr}$	$tsr^{lr}$
1	173	250	314	158	230	200	200
2	287	253	257	215	150	250	150

**Tablo 5.11:**  $k$  toplama merkezindeki  $i$  ürünleri için elinde bulundurma miktarları

$i$	$k=1$	$k=2$
1	5000	3000
2	1000	2000
$w_i^k$ 3	850	1000
4	1000	1000
5	1500	1200
1	0,150	0,110
2	0,120	0,090
$gk_i^k$ 3	0,060	0,040
4	0,022	0,020
5	0,015	0,010

**Tablo 5.12:** Ürün gruplarına göre taşıyıcılardaki kapasite ve CO<sub>2</sub> emisyon ceza katsayıları

$i$	$vl_i^{t1}$	$vl_i^{t2}$	$vl_i^{t3}$	$Co_i^{t1}$	$Co_i^{t2}$	$Co_i^{t3}$	$Ed_i$	$Er_i$
1	300	1500	900	0,0004	0,0003	0,0002	0,00015	0,004
2	400	2000	1200	0,0005	0,0004	0,0003	0,00016	0,005
3	500	2500	1500	0,0006	0,0005	0,0004	0,00017	0,006
4	320	1600	960	0,0007	0,0006	0,0005	0,00018	0,007
5	250	1250	750	0,0008	0,0007	0,0006	0,00019	0,008

Kapalı döngü tedarikçi ağının karma tamsayılı programlama modeli, 3113 değişken ve 808.311 kısıt içermektedir. Tüm deneyler, ILOG CPLEX 12.7.1 çözücüsü kullanılarak Intel Core i7 işlemcili 8GB Ram ve 64 bit işletim sistemli 3,40 GHz özelliklerine sahip bilgisayarda 0,72 sn'de gerçekleştirilmiştir. Sonuç tablosu Tablo 5.13'de yer almaktadır.

**Tablo 5.13:** Performans ölçüleri(x1000\$)

Toplam Kazanç	9692,71	100,00%*
Toplam gelir	15991,00	164,98%
<i>i</i> satış geliri RI	15969,40	164,76%
<u>u</u> . satış geliri RU	12,53	0,13%
<i>i</i> . çevresel kazanç EDI	8,90	0,09%
<u>u</u> . çevresel kazanç ENU	0,16	0,002%
Toplam Maliyet	6298,29	64,98%
CIF	1589,48	16,40%
CTR	718,07	7,41%
CTF	1396,80	14,41%
CIR	1274,39	13,15%
CU	19,32	0,20%
CH	37,12	0,38%
COI	1178,83	12,16%
COU	1,56	0,02%
COH	82,72	0,85%

\* Hesaplama (Performans göstergesi/Toplam kazanç) x 100.

Sonuçlar incelendiğinde toplam kazanç değeri 9.692,71\$ olarak görülmektedir. Yeni ürünler için ileri tedarik zinciri maliyeti en yüksek maliyeti oluşturmaktadır. Aynı zamanda taşıma maliyetleri de toplam maliyetler içerisinde önemli bir değere (%53,63) sahip olduğu görülmektedir. Taşıma maliyetleri (CTR+CTF+COI+COU+COH) 3.377,98\$ olarak hesaplanmıştır.

Talep karşılanma yolları Tablo 5.14 ile Tablo 5.18. arasında yer almaktadır. Tablo 5.14 üreticiler tarafından karşılanan yeni ürün taleplerini göstermektedir. Tablo 5.14 incelendiğinde tüm yeni ürün taleplerinin karşılandığı görülmektedir. Tabloda görüldüğü gibi örneğin mağaza 1'in 300 birimlik ürün 1 talebi üretici 1 tarafından taşıyıcı 1 ile dağıtım merkezi 2 yolu ile karşılanmaktadır.

**Tablo 5.14:** Üreticilerden talep karşılama yolları  $Q_{ci}^{tds}$ 

$c$	$i$	$j$	$t$	$r$	Adet
1	1	1	2	1	300
1	2	1	2	1	400
1	3	1	2	1	300
1	4	1	2	1	10
2	1	1	1	1	200
2	2	1	1	1	400
2	3	1	1	1	300
2	4	1	1	1	4
3	1	1	1	1	360
3	2	1	1	1	100
3	3	1	1	1	200
3	4	1	1	1	2
4	1	1	1	1	240
4	2	1	1	1	200
4	3	1	1	1	250
5	1	1	1	1	200
5	2	1	1	1	200
5	3	1	1	1	160

Tablo 5.15 mağazalardan karşılanan yenilenen ürün taleplerini içerirken Tablo 5.16 toplama merkezlerinden karşılanan yenilenen ürün taleplerini göstermektedir. Tablo 3.15 incelendiğinde mağaza 1 için toplam 380 adet talebin karşılandığı görülmektedir. Benzer şekilde mağaza 2'nin 140 adet, mağaza 3 için 14 adet, mağaza 4 için 318 adet ve mağaza 5 için 65 adet yenilenen ürün talebinin mağazalardan toplanan kullanılmış/kullanım ömrü dolmuş ürünlerden karşılandığı görülmektedir. Ek olarak sadece hasar durumu 1 olan kullanılmış/kullanım ömrü dolmuş ürünlerin daha kalitesiz ürünler yerine tercih edildiği görülmektedir.

**Tablo 5.15:** Mağazalardan talep karşılama yolları  $WC_{cij}^{tr}$ 

$c$	$i$	$j$	$t$	$r$	Adet
1	1	1	1	1	100
1	2	1	1	1	160
1	3	1	1	1	120
2	1	1	1	1	120
2	2	1	1	2	20
3	1	1	1	2	14
4	1	1	1	1	180
4	2	1	1	1	120
4	3	1	1	1	18
5	1	1	1	2	64
5	2	1	1	2	1

Tablo 5.16 incelendiğinde toplamda mağaza 1 için 4 adet, mağaza 2 için 170 adet, mağaza 3 için 308 adet, mağaza 4 için 100 adet ve mağaza 5 için 239 adet talebin toplama merkezlerinden alınan kullanılmış/kullanım ömrü dolmuş ürünlerin yenilenmesi ile karşılandığı görülmektedir.

**Tablo 5.16:** Toplama merkezlerinden talep karşılama yolları  $WK_{cij}^{tr}$ 

$c$	$i$	$j$	$t$	$r$	Adet
1	3	2	3	1	1
1	3	2	1	1	3
2	2	1	1	2	69
2	2	3	1	2	31
2	3	2	1	2	1
2	3	3	1	2	69
3	1	2	1	2	76
3	2	1	1	2	75
3	2	2	1	2	65
3	3	2	1	2	38
3	3	3	1	2	54
4	3	1	1	1	9
4	3	3	1	1	20
4	3	3	1	2	21
4	3	4	1	1	50
5	1	1	1	2	38
5	1	4	1	2	12
5	2	3	1	2	99
5	3	1	1	2	29
5	3	1	2	1	4
5	3	2	1	2	1
5	3	3	1	2	56

Tablo 5.15 ve Tablo 5.16'ya göre toplam talebin % 99,66'sı karşılanmış olup bunun 917 adedi mağazalardan 821 adedi ise toplama merkezlerinden karşılanmıştır. Tablo 5.17 yarı mamul/faydalı malzemelerin talep karşılanma detaylarını göstermektedir.

**Tablo 5.17:** Yarı mamul/faydalı malzemelerin talep karşılanma yolları  $XY_u^{tsr}$

$u$	$t$	$s$	$r$	Miktar (kg)
1	1	1	2	10
2	3	1	2	30
3	1	1	2	30
4	1	1	2	60
5	1	1	2	30
6	1	1	1	0.053
6	1	1	2	59,947
7	1	1	2	30
8	1	1	2	60

Tablo 5.17'ye göre tüm talepler karşılanmıştır.

#### 5.4 Duyarlılık Analizleri

Bu bölümde modelin farklı parametre ve değerlerle çalışması ile çözüm üzerindeki etkilerinin ne şekilde değiştiğinin gözlenmesi adına farklı örnek deney setleri ve parametre değerleri kullanılarak model çözülmüştür. Tablo 5.18, Tablo 5.19, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de farklı parametre değerlerine göre Bölüm 5.1'deki örnek uygulamada yer alan model sınanmıştır. Tablo 5.20'de ise örnek deney setleri yer almakta olup Tablo 5.21 ile Tablo 5.22'de deney setlerine göre çözümler yer almaktadır.

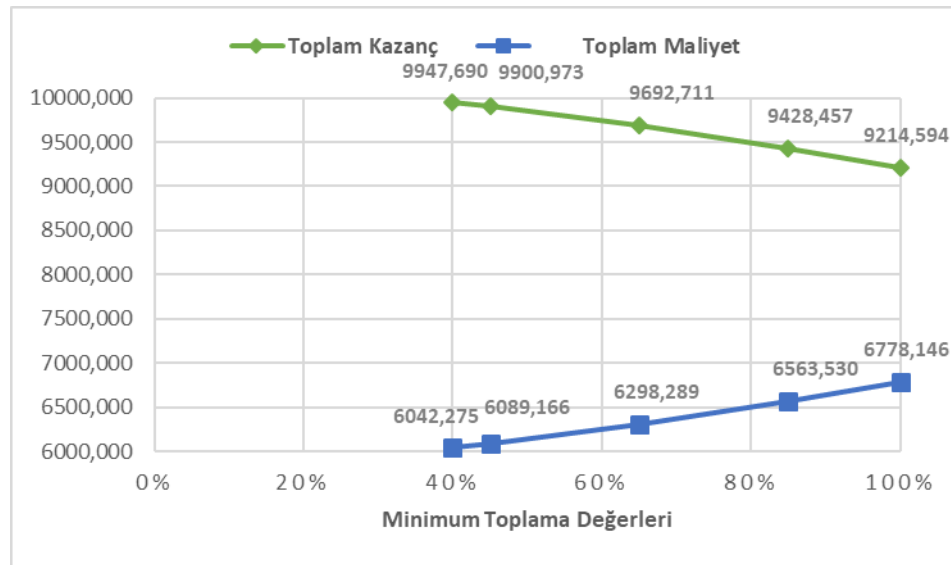
Yönetmelikle AB üyesi ülkelerdeki e-atık toplama hedefi, son 3 yılda piyasaya sürülen EEE'lerin ortalama ağırlığının %45'i olarak belirlenmiştir. Direktif, 2019 yılı ve sonrası için toplama hedeflerini büyüterek %65'e çıkarmıştır. Ayrıca direktifte, ülke sınırları içinde üretilen AEEE'lerin %85'nin toplanması hedefi belirtilmiştir. Birliğe "yeni" katılmış ülkeler için, altyapı yetersizlikleri ve kaynak sıkıntılarından dolayı, son 3 yılda piyasaya sürülen EEE'lerin ortalama ağırlığının %40'ından düşük olmayacak şekilde bir toplama hedefi de belirlemiştir. Buna göre yukarıda bağımsız

üreticinin tüm maliyetleri yüklediği ve minimum toplama hedefi ürettiği ve yenilediği ürün toplamının %65'i kadar iken Tablo 5.18'de üretilen ürün üzerinden farklı yüzdelere sahip minimum toplama hedefleri dahilindeki sonuç karşılaştırmaları yer almaktadır.

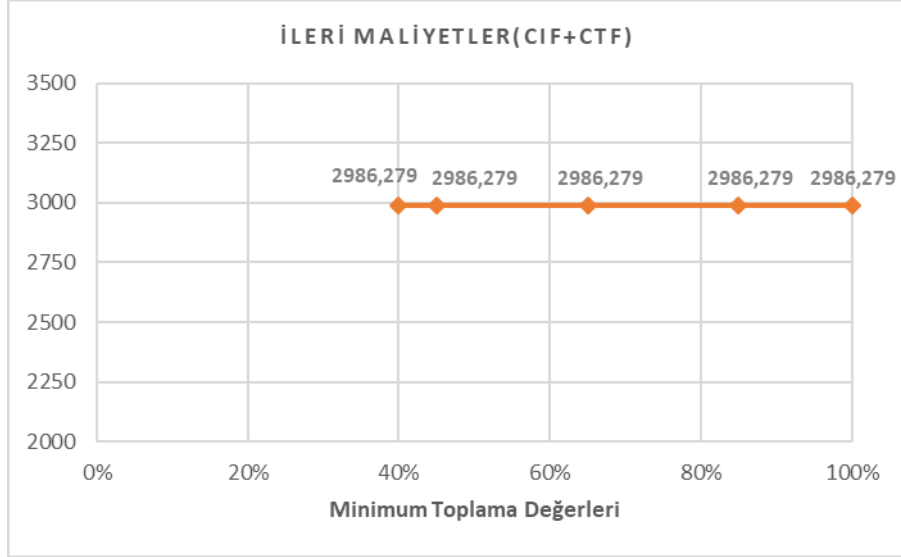
**Tablo 5.18:** Minimum toplama hedeflerine göre karşılaştırmalı sonuçlar

	$mins_i$ (%100)	$mins_i$ (%85)	$mins_i$ (%65)	$mins_i$ (%45)	$mins_i$ (%40)
Toplam Kazanç*(\$)	9214,594	9428,457	9692,711	9900,973	9947,690
Toplam gelir*(\$)	15.992,740	15.991,987	15.991,000	15.990,1	15.989,965
<i>i</i> satış geliri RI*(\$)	15.969,400	15.969,400	15.969,400	15.969,4	15.969,400
<i>u.</i> satış geliri RU*(\$)	13,950	13,335	12,533	11,855	11,724
<i>i.</i> çevresel kazanç EDI*(\$)	9,226	9,088	8,903	8,721	8,678
<i>u.</i> çevresel kazanç ENU*(\$)	0,163	0,163	0,163	0,163	0,163
Toplam Maliyet*(\$)	6778,146	6563,530	6298,289	6089,166	6042,275
CIF*(\$)	1589,483	1589,483	1589,483	1589,483	1589,483
CTR*(\$)	896,403	821,385	718,072	651,590	636,500
CTF*(\$)	1396,796	1396,796	1396,796	1396,796	1396,796
CIR*(\$)	1330,464	1297,737	1274,386	1238,152	1231,400
CU*(\$)	19,340	19,352	19,320	19,320	19,320
CH*(\$)	99,894	67,220	37,121	15,091	9,338
COI*(\$)	1286,937	1241,407	1178,826	1143,494	1137,000
COU*(\$)	1,562	1,560	1,558	1,558	1,562
COH*(\$)	157,264	128,586	82,723	33,680	20,876
Çözüm zamanı (sn)	1,85	13,66	0,72	1,06	2,64

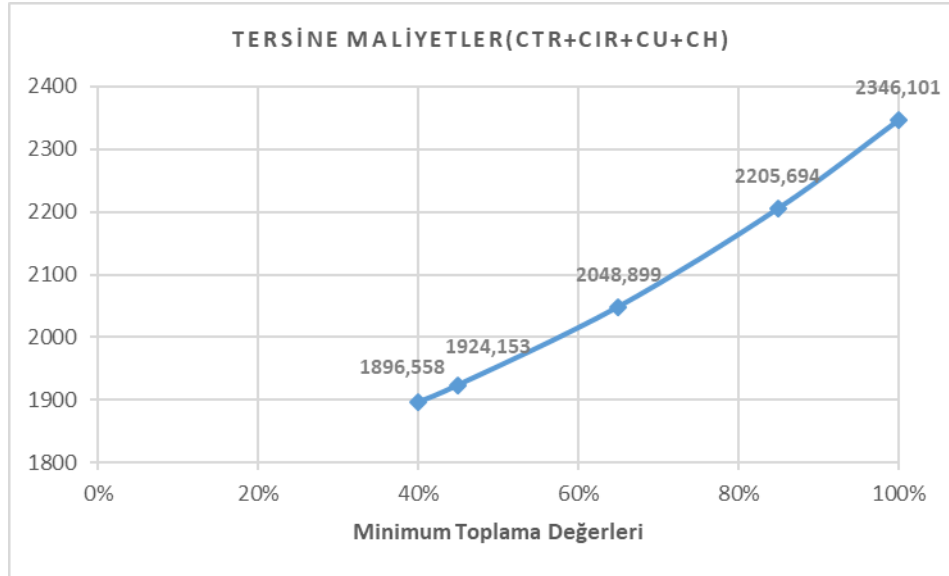
\*x1000



**Şekil 5.3:** Minimum toplama miktarlarına göre toplam maliyet ve kazanç değerleri (\$)

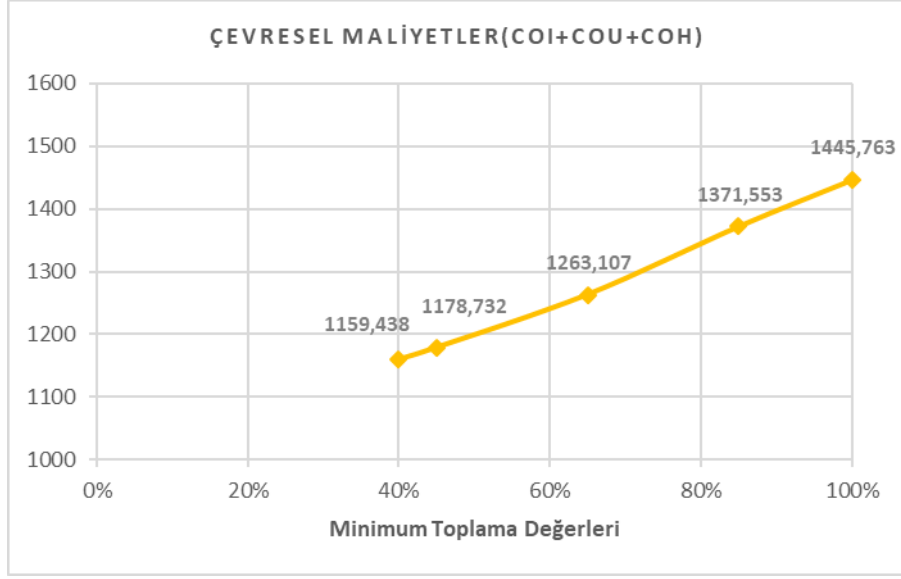


**Şekil 5.4:** Minimum toplama miktarlarına göre toplam ileri tedarik zinciri maliyet değerleri (\$)



**Şekil 5.5:** Minimum toplama miktarlarına göre toplam tersine tedarik zinciri maliyet değerleri (\$)





**Şekil 5.6:** Minimum toplama miktarlarına göre toplam çevresel maliyet değerleri (\$)

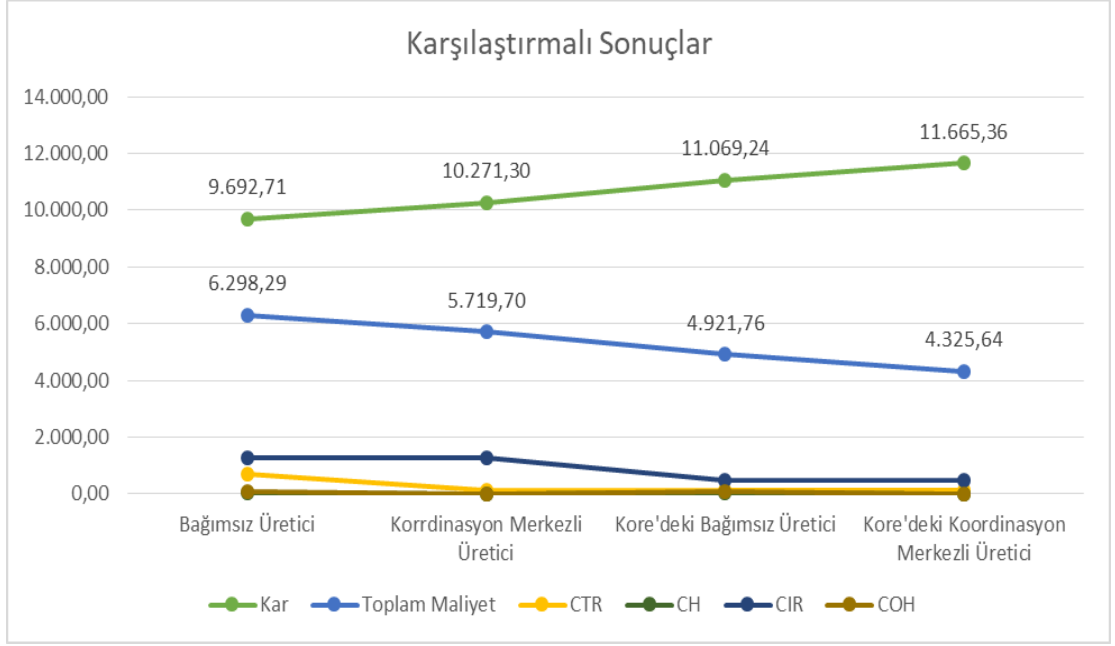
Tablo 5.18, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 incelendiğinde yönetmelikteki üretimlerin farklı yüzde değerleri ile bağımsız üretici tarafından toplanması gereken minimum e-atık miktarları azaldıkça kazancın arttığı maliyetlerin ise düştüğü görülmektedir. Tablodan da anlaşılacağı üzere ileri yöndeki maliyet ve kazanç değerleri değişmezken daha az ürün toplayarak işleyen üretici gereksinim fazlası ile işlem yapmadığından kazancını %7,96 oranında arttırmıştır. Buna göre, bağımsız üreticinin ilerleyen zamanlarda daha fazla ürün toplamak zorunda kalacağından ve kazancı düşeceğinden sistemini ve maliyetlerini bu durumu karşılayabilecek şekilde yeniden düzenlemesi gerektiği görülmektedir.

Yönetmeliğe göre koordinasyon merkezinin kurulması ve bu merkeze bağlı üreticiler tarafından maliyetlerin ve aidatların ödenmesi ile birlikte mağazaların da yetkilendirilmiş kuruluş olarak nitelendirilmesi sonucunda üreticiye düşen maliyet ve kazanç değerleri Tablo 5.19’da gösterilmektedir. Buna göre üretici, CTR değerinde CH ve COH değerlerinin mağazalarla birlikte ortak paylaşımı ile 1/6’sını karşılayacaktır. Burada çevresel kazanç değerleri üreticiye eklendiğinden çevresel maliyetler ortak paylaşıma eklenmemiştir. Ancak bu değerlerde benzer şekilde üreticiler arasında paylaşılabilir.

**Tablo 5.19:** Koordinasyon merkezine bağılı üreticiler için performans ölçüleri (x1000\$)

Toplam Kazanç	<b>10.271,299</b>
Toplam gelir	15.991,000
<i>i</i> satış geliri RI	15.969,400
<u>u.</u> satış geliri RU	12,533
<i>i.</i> çevresel kazanç EDI	8,903
<u>u.</u> çevresel kazanç ENU	0,163
Toplam Maliyet	<b>5719,701</b>
CIF	1589,483
CTR	<b>119,679</b>
CTF	1396,796
CIR	1274,386
CU	19,320
CH	<b>6,187</b>
COI	1178,826
COU	1,558
COH	<b>13,787</b>

Tablo 5.19 incelendiğinde bağımsız üretici olmak yerine koordinasyona üye olunması ile maliyetlerin bazıları üyelere paylaştırılabilmiş ve üreticinin toplam kazancı 578,588\$ yani %5,63 oranında artmıştır. Dolayısı ile koordinasyon merkezinin kurulması ile bağımsız üreticiler maliyetlerinin bazılarını ortak ödeyerek kazanç arttırımına gidebilmektedirler. Ayrıca Kore’de kullandıkları e-atıkların geri dönüşümü ve taşıma maliyetlerini tüketiciler karşılamaktadır (Terazono ve diğ. 2006). Kore’deki durum dikkate alındığında demontaj, yenileme ve taşıma maliyetleri tüketiciler tarafından karşılanmakta ve CIR değerinin de 496,256\$ üretici tarafından karşılanırken 784,130\$ değeri tüketici tarafından karşılanacaktır. Buna göre Kore’deki koordinasyon merkezli bir firma için toplam kazanç 11.665,364\$ olacaktır. İncelenen bu durumlara göre maliyet ve kar dağılımları Şekil 5.7’de yer almaktadır.



**Şekil 5.7:** Üreticilerin performans farklılıkları (\$)

Modelde çevresel etki kazanç katsayıları olan,  $Ed_i$ ,  $Er_i$  ve  $En_u$  değerleri  $\alpha$  (1, 5, 50, 500, 1000) gibi bir katsayı çarpılarak çevresel kazanç değerlerinin artırılması ile modelin duyarlılığı incelendiğinde  $\alpha=500$  değerine kadar maliyet ve satış gelirlerinde dikkate alınabilir bir fark yaratmadığı bu değerde ise tersine maliyetlerde çok az bir fark yarattığı görülmektedir. Bu değere kadar çevresel kazanç katsayısının artması nedeni ile EDI ve ENU değerlerindeki artış nedeni ile toplam kazanç değerinin arttığı görülmektedir.  $\alpha=1000$  değerinde ise CIR (Kullanılmış/kullanım ömrü dolmuş ve yenilenen ürün  $i$  için tersine tedarik zinciri maliyeti) CTR (Kullanılmış/kullanım ömrü dolmuş ve yenilenen ürün  $i$  için tersine lojistik maliyeti) ve COI (Ürün  $i$  için taşımadan kaynaklı toplam CO<sub>2</sub> emisyon ceza maliyeti) değerlerinde  $\alpha=1$  değerindeki verilerle kıyaslandığında sırası ile % 1,66, %0,35 ve %0,94 oranında artış gerçekleşmiştir. Bu değerlerin artışında kullanılmış ürün alışı ve ikincil pazara yarı mamul/yararlı malzeme satışındaki ufak artışlar etkili olmuştur.

Diğer bir duyarlılık analizinde farklı sayıdaki üretici ve mağaza sayıları ile model sınanmıştır. Buna göre, Tablo 5.20’de örnek deney setlerinde yer alan değerler yer almaktadır. Deney setleri hazırlanır iken üretici sayısı ve mağaza sayısının artışına karşılık modelin duyarlılığının nasıl etkilendiğinin izlenmesi planlanmaktadır. Buna

göre küçük ölçekli problem setinde tek üretici, orta ölçekli problem setinde 3 üretici, büyük ölçekli problem seti olarak ise 5 üretici yer almaktadır.

**Tablo 5.20:** Deney Setleri

Senaryo	$s$	$c$	$i$	$d$	$t$	$r$	$k$	$l$	$h$	$u$	$j$
I.	1	5	5	2	3	2	2	1	2	8	4
II.	1	10	5	2	3	2	2	1	2	8	4
III.	1	25	5	2	3	2	2	1	2	8	4
IV.	3	5	5	2	3	2	2	1	2	8	4
V.	3	10	5	2	3	2	2	1	2	8	4
VI.	3	25	5	2	3	2	2	1	2	8	4
VII.	5	5	5	2	3	2	2	1	2	8	4
VIII.	5	10	5	2	3	2	2	1	2	8	4
IX.	5	25	5	2	3	2	2	1	2	8	4

Deney setlerinde yer alan üretici ve mağazalara bağlı parametreler örnek uygulamada yer alan verilerin rassal sayı üretimi ve çarpımları sonrasında elde edilmiştir. Buna bağlı olarak modelin çalışması adına kapasite değerlerinde artışa gidilmiş olup bazı çözümler kapasite kısıtlarına takılarak daha düşük sonuçlar üretmektedir. Deney setlerine ait çözüm değerleri Tablo 5.21’de yer almaktadır.

Deney setlerinde kapasite arttırmaları ile direkt çözüm üretmek yerine negatif yönde sapmalar (  $de_{ci}^-$  ,  $dr_{ci}^-$  ,  $du_{us}^-$  ) ile modele yoksatma maliyetleri eklenerek çözülmüştür. Buna bağlı olarak modeldeki kısıt 5.2, 5.5 ve 5.25 sırası ile hesaplama 5.42, 5.43 ve 5.44 olarak yeniden yazılmıştır.

$$\sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} Q_{ci}^{tds} + de_{ci}^- = de_{ci} \quad \forall c \in C, i \in I \quad (5.42)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} (WC_{cij}^{tr} + WK_{cij}^{tr}) + dr_{ci}^- = dr_{ci} \quad \forall c \in C, i \in I \quad (5.43)$$

$$du_u^s = \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} XY_u^{tsr} + du_{us}^- \quad \forall u \in U, s \in S \quad (5.44)$$

**Tablo 5.21:** Deney setlerine göre karşılaştırmalı sonuçlar

Senaryo #	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Parametreler									
$s$	1	1	1	3	3	3	5	5	5
$c$	5	10	25	5	10	25	5	10	25
Toplam Kar (TP-TLSC) *(\$)	9214,59	<b>8051,72</b>	<b>-64.917,71</b>	10.239,12	23.618,78	<b>34.695,13</b>	10.053,13	23.569,80	65.684,26
Toplam Kazanç (TP)*(\$)	9214,59	18.313,92	29.890,27	10.239,12	23.618,78	57.985,33	10.053,21	23.569,80	65.684,26
Toplam Gelir*(\$)	15.992,7	28.620,79	45.103,85	16.024,31	33.783,59	80.894,56	16.067,545	33.827,02	92.583,38
RI*(\$)	15.969,4	28.589,70	45.045,80	15.969,40	33.720,80	80.804,60	15.969,40	33.720,80	92.449,70
RU*(\$)	13,95	12,54	11,60	45,14	43,87	43,07	88,02	86,93	86,36
EDI*(\$)	9,23	18,388	46,29	9,23	18,38	46,34	9,23	18,38	46,41
ENU*(\$)	0,16	0,16	0,16	0,54	0,54	0,54	0,91	0,91	0,91
Toplam Maliyet*(\$)	6778,15	10.306,87	15.213,58	5785,19	10.164,82	22.909,23	6014,34	10.257,22	26.899,12
CIF*(\$)	1589,48	2614,13	2974,54	403,40	1246,78	4258,21	385,88	1049,38	4778,34
CTR*(\$)	896,40	1137,45	1961,39	906,38	1190,73	2181,20	926,34	1203,38	2250,25
CTF*(\$)	1396,80	2116,45	1999,36	1396,80	2675,20	6208,21	1396,80	2675,20	8226,06
CIR*(\$)	1330,47	2532,62	6136,51	1448,40	2636,31	6249,40	1612,68	2855,67	6394,86
CU*(\$)	19,34	19,36	20,29	72,62	72,70	73,24	117,13	115,36	116,86
CH*(\$)	99,89	35,70	1,19	99,89	35,70	1,89	99,89	36,29	3,84
COI*(\$)	1286,94	1769,95	2115,75	1294,20	2221,44	3926,14	1308,76	2231,31	5109,61
COU*(\$)	1,56	1,56	1,61	6,24	6,30	6,30	9,60	9,53	9,87
COH*(\$)	157,26	79,65	2,93	157,26	79,65	4,64	157,26	81,11	9,43
Toplam Yok Satma Maliyeti(TLSC)*(\$)	0	10.262,20	94.807,98	0	0	23.290,20	0,08	0	0
$de_{ci}^-$	0	1988	16107	0	0	4601	0	0	0
$dr_{ci}^-$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$du_{us}^-$	0	0	0,02	0	0	0	0,01	0	0

\*x1000

Tablo 5.21'deki toplam kar değerleri incelendiğinde senaryo II, III ve VI için toplam kazanç değerinden daha düşük olduğu ve yeni ürün taleplerinin karşılanamadığı görülmektedir. Bu deneylerdeki veriler incelendiğinde mağaza sayılarının artışı ile birlikte artan talepleri karşılayabilmek adına yeterli üretici kapasitelerinin olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır. Bu nedenle yok satma maliyetleri bu testler için sırası ile 10.262,20\$, 94.807,98\$ ve 23.290,20\$ olarak hesaplanmaktadır. Aynı zamanda senaryo VII'de yarı mamul/faydalı malzeme talebinin karşılanamaması nedeni ile çok küçük miktarda yok satma bedeline katlanıldığı görülmektedir.

Senaryo I, IV ve VII incelendiğinde mağaza sayılarının, CH, COH, CTF, EDI ve RI değerlerinin aynı olmasına rağmen toplam kar değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu artışın nedeni daha fazla demontaj işlemi ile birlikte talep fazlası yarı mamul/faydalı malzemelerin ikincil pazarlarda satışı sonucunda RU ve ENU kazanç değerlerindeki artışlardır. Ek olarak, tersine tedarik zinciri maliyetlerinden CTR ve CIR değerleri de demontaj süreci nedeni ile artış göstermiştir. Bu testlerdeki en yüksek farklılık daha fazla üreticinin sistemde bulunması ile müşterilerin daha ucuz alternatif ürün tercihleri neticesinde ileri yöndeki maliyetlerdeki azalmalar nedeni ile CIF değerindedir.

Tablo 5.22'da üreticilerin üretim kapasitelerinin arttırılması ile yani kapasitelerin tüm talepleri karşılayacak şekilde yeterli olduğu varsayımı altında çözümler yer almaktadır. Buna göre Senaryo II, III ve VI için zmler Tablo 5.21'den farklılık göstermektedir.

**Tablo 5.22:** Kapasite arttırımı ile çözülen deneyler

	II	III	VI
Toplam Kazanç* (\$)	21.661,15	58.487,32	64.911,93
Toplam gelir* (\$)	33.751,89	92.507,75	92.539,67
<i>i</i> satış geliri RI* (\$)	33.720,80	92.449,70	92.449,70
<u>u</u> . satış geliri RU* (\$)	12,54	11,60	43,07
<i>i</i> . çevresel kazanç EDI* (\$)	18,39	46,29	46,35
<u>u</u> . çevresel kazanç ENU* (\$)	0,16	0,16	0,54
Toplam Maliyet* (\$)	12.090,74	34.020,19	27.627,74
CIF* (\$)	3388,46	9541,00	5823,32
CTR* (\$)	1159,64	2135,39	2183,10
CTF* (\$)	2675,20	8226,06	8226,06
CIR* (\$)	2532,62	6136,51	6249,40
CU* (\$)	19,36	20,29	73,24
CH* (\$)	35,70	1,19	1,89
COI* (\$)	2198,56	5025,14	5059,79
COU* (\$)	1,56	1,61	6,30
COH* (\$)	79,65	2,93	4,64
$de_{ci}^-$	0	0	0

\*x1000

Tablo 5.22' ile Tablo 5.21'deki veriler karşılaştırıldığında CIF, CTF ve COI değerleri yeni ürün taleplerin karşılanması ile ileri tedarik zinciri maliyetleri artmıştır. Senaryolarda karşılanmayan talep olmadığından yok satma maliyeti 0 olup yeni ürün satış geliri RI değeri artmıştır. Ayrıca CTR değeri tersine lojistikte daha pahalı taşıyıcı ile taşıma yapıldığından Tablo 5.21'den farklı olarak artmıştır. Sonuç olarak toplam kazanç değeri senaryolara göre sırası ile %18,28, %95,67 ve %11,95 oranında artmıştır.

### 5.5 Model Sonuçları ve Modelin Çalışma Alanına Katkısı

Çalışmada, genişletilmiş üretici sorumluluğu gereği karar verici olarak bağımsız bir üretici veya üretici grubu, üçüncü parti firmalar tarafından oluşturulan bir yönetim organı için yönetmelik gereklilikleri ile birlikte oluşturulması gereken kapalı döngü tedarik zinciri ağı modeli kurgulanarak model örnek bir problem üzerinden senaryolar yardımı ile test edilmiş ve yorumlanmıştır. Model 1'deki gibi farklı kalite seviyeleri modelde yer almakta olup Model 2'de yönetmelik gerekliliklerinin yanısıra çevresel kriter etkileri de dikkate alınmıştır. Kısacası Model 2, Model 1'de yer alan tersine tedarik zinciri ağına ileri tedarik zincirinin ve çevresel kriter etkilerinin

eklenmesi ile daha karmaşık yapıdaki bir ağ için tasarlanmıştır. Modelde literatürden farklı olarak yönetmelikte yer alan minimum toplama miktarları yine satış bedelleri üzerinden hesaplanarak yıllara göre artması zorunluluğu ele alınmış olup karar vericilere maliyetlerini düşürmelerinde yol gösterilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda üretici ve mağaza sayıları ile çevresel katsayıların model üzerindeki etkileri senaryo analizleri ile test edilmiştir.

Sonuç olarak üretici ve mağaza sayılarının etkileri incelendiğinde, mağaza sayısı aynı kalırken artan üretici sayısının sonucunda daha yüksek kar ve tersine tedarik zinciri faaliyetleri ile ilişkili maliyet artışlarının elde edildiği görülmektedir. Bu bulgu üreticilerin e-atıklardan geri kazanılmış parça veya kullanılabilir yararlı malzeme taleplerindeki artış ile bağlantılı olabilmektedir. Diğer yandan üretici sayısı aynı kaldığında artan mağaza sayısı ile daha yüksek toplam kar sağlanırken, üretici kapasitelerinin artan talepleri karşımada yetersiz kaldığı ve talebi karşılamak için kapasite artırımına gidilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda AEEE Kontrol Yönetmeliğine göre elektronik atıkların yakın gelecekte artan bir oranda toplanmaları gerektiğinden tersine tedarik zinciri yönetimi ile ilgili maliyetlerin artacağı kanıtlanmaktadır. Bu maliyet sorunlarıyla başa çıkabilmek adına üreticilerin, nakliye ve geri dönüşüm/yenileme süreçlerini yönetmek için işbirliğine dayalı organizasyon yapıları olarak koordinasyon merkezlerini kurmak gibi daha etkin ve etkili yaklaşımlar bulmaları gerekmektedir. Ancak model sınırlılıkları gereği belli kısıt ve varsayımlar altında hipotetik bir problem üzerinden test edilmiştir. Dolayısı ile gelecek çalışmalarda gerçek veriler kullanılarak model test edilebileceği gibi tek bir periyot yerine çoklu periyotlar şeklinde kurgulanabilir ve karar verici olarak koordinasyon merkezinin görev ve sorumlulukları belirlenerek modele entegre edilebilir. Model elektronik atıkların özelliği gereği belirsizliklerin ele alınmasında bulanık olarak kurgulanabilir. Aynı zamanda karar verici olarak geri dönüşüm ve yenileme faaliyetlerinde çevresel etkilerin belirlenmesinde yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yöntemi kullanılabilir.



## **6. ÜRÜN YENİLEME SÜREÇLERİNİ İÇEREN PERİYODA DAYALI KOORDİNASYON MERKEZLİ BULANIK TERSİNE TEDARİK ZİNCİRİ AĞ TASARIMI (MODEL 3)**

E-atık ile tersine tedarik zinciri ağ tasarımı literatür incelemesi sonrasında hala eksikliklerin olduğu ve özellikle yönetmelikte yer alan aktör sorumluluklarının modellere entegrasyonunun yeterince ele alınmadığı görülmektedir. Bu çalışma ile bu eksikliğin giderilmesi adına Model 3, Model 1 ve Model 2’de yer alan e-atık için tersine tedarik zincirindeki ağı ağa koordinasyon merkezinin eklenmesi ve periyotlara göre yeniden tasarlanması ile geliştirilmiştir. Model 1 ve Model 2’de yer alan benzer indis, parametre, karar değişkeni, hesaplama ve kısıtlar bu bölümde tekrar sunulmuştur. Amaç Model 3’ün okunurluğunun ve bölüm bütünlüğünün sağlanmasıdır. Model 3’e Model 1 ve Model 2’den farklı olarak anlaşma yapılan toplama merkezlerindeki tüm ürünlerin alınma zorunluluğu da dikkate alınmıştır. Modelin sınanması farklı üyelik değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Koordinasyon merkezi kar amacı gütmemesine rağmen kendi işbirliklerinin yararını gözeterek ağın gereksinimlerini karşılaması gerekmektedir. Ayrıca model, mağaza, geri dönüşüm merkezi ve koordinasyon merkezi olarak üç karar etkileşimli olup yok satma maliyetleri ve stok maliyetleri de dikkate alınacaktır.

### **6.1 Koordinasyon Merkezin Direktifteki ve Uygulamalardaki Rolü**

Yetkilendirilmiş kuruluşların ve yetkilendirilmiş kuruluş yapısına girmeden yönetmeliğin 17’nci maddesine göre teminat sunan üreticilerin, Bakanlık ve yerel yönetimlerle olan koordinasyonlarının sağlanması amacıyla, kâr amacı gütmeyen ortak bir Koordinasyon Merkezi kurmaları zorunludur. Koordinasyon merkezi, toplanan evsel AEEE’lerin üreticilerin pazar paylarına göre paylaşılmasını sağlamakla, Bakanlık tarafından oluşturulacak kayıt sistemine kayıt olan üreticilerin kayıt bilgilerinin doğrulamasını sağlamakla, belediyelerce toplanan evsel AEEE’lerin işleme tesislerine taşınarak çevre lisanslı tesislerde geri kazanım veya bertarafını sağlamakla, piyasaya sürülen, toplanan, ihraç edilen, yeniden kullanılan, geri dönüştürülen ve geri kazanılan AEEE miktarları ve oranları hakkında Bakanlığa rapor sunmakla yükümlüdürler. Ayrıca sözleşme yaptığı belediyelerde veya getirme

merkezlerinde toplanan AEEE'leri geri kazanımını sağlamak üzere tamamını geri almakla veya aldirmekle yükümlüdürler (AEEKY 2012; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015; REC 2016).

Koordinasyon Merkezleri'nin faaliyetleri ülkeden ülkeye farklılıklar göstermektedir. Fransa'da ve İtalya'da koordinasyon merkezleri, yetkilendirilmiş kuruluşlar arasında toplama merkezlerinin paylaşılması görevlerini yürütürken, bazı Avrupa Birliği ülkelerinde (Örn: Almanya) ulusal kayıt merkezi olarak da görev almaktadırlar. Almanya'da faaliyet gösteren EAR ve Danimarka'daki DPA hem bir koordinasyon merkezi hem de ulusal kayıt sistemidir (REC 2011).

DPA'nın görevleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir (REC 2011).

- Yasal olarak üretici kayıtlarını sistemleştirmek ve sisteme işletmek,
- Yasal tüm üretici ve ithalatçılardan kayıtları toplamak,
- Kolektif üretici kuruluşlarını kaydetmek (yetkilendirilmiş kuruluşlar),
- Yerel makamlardan (belediyelerden) bilgi almak,
- Yasal ücretleri hesaplamak ve vergilendirmek,
- E-atıkları, yasal üreticiler ve ithalatçılar arasında paylaşım,
- Taraf olan tüm kişiler ve kurumlar için bilgilendirmeler sunmaktır.

Koordinasyon merkezi örneklerini incelediğimizde, Fransa'da üreticiler yetkilendirilmiş kuruluşlara üye olarak EPR sorumluluklarını yerine getirmek zorunda ve koordinasyon merkezi (OCAD3E) yetkilendirilmiş kuruluşlar ile toplama merkezleri arasındaki koordinasyonu sağlamaktadır. Almanya'da üreticiler bireysel olarak sorumluluklarını yerine getirebildikleri gibi yetkilendirilmiş kuruluşlara üye olarak koordinasyon merkezi ile iletişimde olabilmektedirler. Burada üreticiler yükümlülüklerini lojistik ve toplama firması ile sözleşme imzalayarak devredebilmektedirler. İtalya'da yetkilendirilmiş kuruluşların birleşerek oluşturdukları "Centro di Coordinamento RAEE" koordinasyon merkezi tüm sistemi koordine etmektedir. Üreticilerin pazar payları dikkate alınarak atık paylaşımı yapılmakta ve eksik ya da fazla atık toplanması durumunda koordinasyon merkezleri atık paylaşımını her yıl değiştirerek güncellemektedirler. Avustralya'da belirlenen toplama hedefleri elektronik eşya üreticilerinin üye olduğu ve e-atık faaliyetlerini yürütmek üzere yetki verdiği yetkilendirilmiş kuruluşlar tarafından bağımsız olarak

gerçekleştirilmektedir (NTCRS 2014). Kanada’da Alberta şehrinde kar amacı gütmeyen bir yetkilendirilmiş kuruluş misyonuyla çalışan Alberta Geri Dönüşüm Yönetimi Otoritesi (ARMA) piyasaya sürenlerden, distribütörlerden ve üreticilerden harçları toplamak üzere ulusal seviye görevlendirilmiştir. ABD’nin California eyaletinde e-atık yönetimi ve WEEE Direktifi dikkate alınarak “Electronic Product Stewardship Canada (EPSC)” koordinasyon merkezi kurulmuştur (Savage ve Ogilvie 2006). Kanada’da kurulan EPSC, Apple, Brother International Corporation, Canon, Dell, Epson, Hewlett Packard, Hitachi, IBM, Lexmark, LG Electronics, Panasonic, Sanyo, Sharp, Sony, Thomson ve Toshiba gibi üreticilerin de merkeze katılımıyla “Kanada Bilgi Teknolojileri Derneğini” ve “Kanada Elektro-Federasyon Derneğini” kurmuşlardır (Savage ve Ogilvie 2006). Türkiye’de henüz bir koordinasyon merkezi kurulmamıştır.

Koordinasyon merkezi ile ilgili literatürdeki çalışmaları incelediğimizde, Kunz ve diğ. (2018), çalışmalarında yönetmelikte yer alan genişletilmiş üretici sorumluluğu (EPR) uygulamalarındaki değişimlerin incelenmesi ve görüşmeler sonrasında üreticiler, üretici sorumluluğuna dahil organizasyonlar (EPR gereği toplama, arıtma ve geri dönüşüm aktivitelerini üretici adına organize edenlerdir ve maliyetlerini üreticiye yüklerler.), atık operatörleri, ulusal otoriteler, belediyeler, ticari birlikler ve koordinasyon merkezini içeren paydaşlar haritasını çıkararak EPR’in her bir grup üzerinde etkisini göstermeye çalışmışlardır. Bu çalışmadaki koordinasyon merkezinin görevi, üreticilerin kayıt olduğu ve onların satış değerlerini toplayan, onlara sorumluluklar yükleyen ayrıca üretici sorumluluğuna dahil organizasyonlara atık toplama sorumluluğunu yükleyen bazen de ulusal otoritelere veri raporlayan bir yapıdadır. Yaptıkları görüşmelere istinaden bugüne kadarki üretici sorumluluğu gereği üreticilerin maliyetleri karşılaması ile olumlu sonuçlara rağmen, ele alınması gereken aşağıdaki durumların varlığı sonucuna ulaşmışlardır.

- Geri dönüşüm standartlarının doğru şekilde uygulamasının nasıl olması gerektiği
- Pozitif net değeri olan atıkların nasıl yapılmalı
- Üretici sorumluluğuna dahil organizasyonlar arasındaki rekabetin rolü
- Geridönüştürülebilirlik için geliştirilen tasarımların teşviklerinin nasıl sağlanacağı

- AB Üye Devletleri arasında uyumlaştırılmış mevzuat ihtiyacı
- EPR için bir koordinasyon çerçevesinin geliştirilmesi
  - Koordinasyon merkezinin amacı, üreticilere aynı kurallar çerçevesinde rekabet etmelerine izin veren kuralların oluşturulması ve gözlenmesi ile üretici sorumluluğuna dahil organizasyonlara atıkların paylaşılması.
- Daha fazla atık toplama hedefine nasıl ulaşılacağıdır.

Isernia ve diğ. (2019) tersine tedarik zincirinde mevcut İtalya'daki WEEE yönetim sisteminin ve WEEE direktifinde kilit rol oynayan toplama merkezlerinin değerlendirilmesi ve dönüşüm olasılık matrisi yöntemi WEEE toplama performansları ile dağıtımları arasındaki korelasyonunu incelemişlerdir. Verileri İtalya'daki koordinasyon merkezi verilerinden temin etmişlerdir. Sonuç olarak ulusal yönetmeliklerin yanı sıra AB Direktifinin toplama performansı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

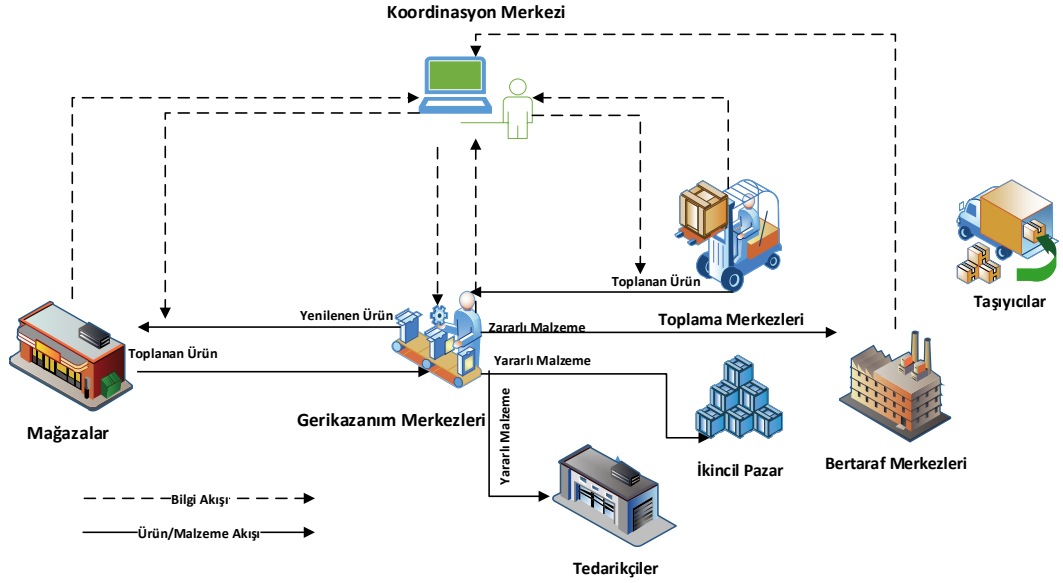
Gerek literatürdeki çalışmaların sonuçlarına göre gerekse e-atık direktifinin bir zorunluluğu olarak e-atıkların tersine tedarik zinciri ağlarındaki bilgi akışının ve sürecin daha etkin olabilmesi adına koordinasyon merkezinin kurularak denetim mekanizması görevini üstlenmesi gerektiği gözlenmektedir.

## 6.2 Modelleme Ortamı

Gerek Yapılan literatür ve uygulama incelemelerine göre koordinasyon merkezinin tersine tedarik zinciri ağına dahil edilerek direktifteki gereklilikler ile birlikte ağın yeniden modellenmesi gerekmektedir. Koordinasyon merkezinin asli görevi, kayıtların tutulmasının yanı sıra toplanan e-atıkları geri dönüşüm tesislerine paylaşmak ve bilgi akışını sağlamaktır. Modeldeki koordinasyon merkezi, döngüsel ekonominin gerçekleştirilmesi ve taşıma sayısının azaltılması gibi konularda işbirliği modelini temsil etmektedir. Koordinasyon merkezi, sadece kayıt tutma görevi yerine genel yapıya ve verilere sahip olması nedeniyle sistemin optimum çalışması için periyotlara göre sistemde oluşan talep ve atıkların yönetiminde merkezi karar alma aracı olarak görev almaktadır. Ayrıca döngüsel ekonomiye uygun atık toplama ve paylaşımının yanı sıra, taşımaların azaltılması ve üreticilere yönetmelik tarafından

yüklenen sorumlulukların yerine getirilmesinde kontrol mekanizması görevini üstlenmektedir.

Model, geri kazanım tesislerinin ( $r$ ) sorumlu olduğu genişletilmiş üretici sorumluluğu gereği, ağın toplama, geri dönüşüm, taşıma ve bertaraf etme maliyetlerine katlanması ve koordinasyon merkezi tarafından yönlendirilen toplanmış ürünleri inceleyerek farklı ürün tipi ( $i$ ) ve hasar durumundaki ( $j$ ) ürünlerin yenileme veya demontaj işlemlerini yürütmektedirler. Modelde anlaşma yapılan toplama merkezlerinden ( $k$ ) toplanan e-atıkların tamamının alınması (AEEKEY 2012; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015) ve geri kazanım tesisleri arasında paylaşılması, tüm ağın bilgisine sahip olan koordinasyon merkezi tarafından sağlanacaktır. Yönetmelikte koordinasyon merkezi, toplanan evsel AEEE'lerin üreticilerin pazar paylarına göre paylaşılmasını sağlamakla yükümlüdür şeklindeki açıklama, modelde her geri kazanım tesisinin toplama ve geri dönüşüm hedeflerinin ve kapasite ile yeteneklerinin farklı olması sonucu çözülebileceğinden ve sistem verimliliği açısından dağıtılacak miktar kararı modele bırakılmıştır. Koordinasyon merkezinin görevi, hangi periyotta ( $p$ ) hangi kanaldan ne kadar toplanan ürünün kendisine bağlı olan hangi geri kazanım tesisine gönderilmesi gerektiğine ağın kar maksimizasyonunu dikkate alarak karar vermektir. Koordinasyon merkezi kar amacı gütmemesine rağmen kendi iştiraklerinin yararını gözeterek ağın gereksinimlerini karşılaması gerekmektedir. Ayrıca model, mağaza, geri kazanım merkezi ve koordinasyon merkezi olarak üç karar merciili olup yok satma maliyetleri ve stok maliyetleri de dikkate alınacaktır. Model gösterimi Şekil 6.1'de yer almaktadır.



**Şekil 6.1:** Koordinasyon merkezli tersine tedarik zinciri ağı

Modelde ürün yaşam döngüsü, kullanılan malzeme değişimi ve istatistiki verilerin yetersizliği nedeni ile sistemdeki bazı veriler bulanık olarak tanımlanmıştır. Buna göre; yenilenen ürünün birim satış fiyatı, ürün kategorilerine göre ürün ağırlıkları, mağazalardan ve toplama merkezinden alınan ürünlerin hasar durumlarına göre alış bedelleri, geri kazanım merkezlerindeki birim yenileme maliyeti ve birim demontaj maliyetleri, toplama merkezlerindeki periyotlara göre elinde bulundurduğu ürün miktarı ile periyotlara göre yenilenen ürün ve yarı mamul/yararlı ürün talepleri bulanık olarak tanımlanmıştır.

Modelde yer alan varsayımlar şunlardır:

- Sistemde tüm süreçlerdeki karar verme otoritesi koordinasyon merkezindedir.
- Mağaza ve geri kazanım merkezi, depo yönetim giderleri dikkate alınmamıştır.
- E-atık toplama maliyetleri toplama merkezleri ve/veya mağazalardan satın alma maliyetlerine dahil edileceği varsayılmıştır.
- Mağazalarda ürünler muayene edilerek hasar durumlarına göre ayrılmaktadır. Muayene bedeli mağazaya aittir.
- Talep fazlası üretilen tüm yarı mamul ve yararlı ürünler ikincil pazarlarda satılmaktadır.
- Yenilenemeyip kullanılmayan zararlı malzemeler bertaraf merkezlerine gönderilmektedir.

- Taşıma kapasiteleri dikkate alınmamış olup taşıma işlemleri üçüncü parti taşıyıcılar tarafından gerçekleştirilmektedir.
- Talepler bölünebilir.

### 6.3 Önerilen Matematiksel Model

Geliştirilen modelde kullanılan indisler, parametreler, karar değişkenleri ve kısıtlar aşağıda yer almaktadır.

#### *İndisler ve Kümeler*

$i \in I$	Ürün grubu kümesi
$s \in S$	Tedarikçi kümesi
$c \in C$	Mağaza kümesi
$t \in T$	Taşıyıcı kümesi
$r \in R$	Geri kazanım merkezi kümesi
$k \in K$	Toplama merkezi kümesi
$l \in L$	Bertaraf merkezi kümesi
$h \in H$	Zararlı malzeme kümesi
$u \in U$	Yarı mamul/yararlı malzeme kümesi
$j \in J$	Hasar durumu kümesi
$p \in P$	Planlama dönemindeki periyot kümesi

#### *Parametreler*

$\tilde{e}_i$	Yenilenen ürün $i$ için birim satış fiyatı
$\tilde{a}_i$	Ürün $i$ 'nin birim ağırlığı
$\tilde{g}c_{ij}$	Toplanan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünün mağazadan birim satın alış fiyatı
$\tilde{g}k_{ik}$	Toplanan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünün toplama merkezi $k$ 'dan birim satın alış fiyatı
$\tilde{w}_{ikp}$	Toplama merkezi $k$ 'nın $p$ periyodunda elinde bulundurduğu $i$ ürün miktarı
$\tilde{q}r_{ijr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $j$ hasar durumundaki $i$ ürünün birim yenileme maliyeti
$\tilde{q}d_{ir}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $i$ ürünün birim demontaj maliyeti (sökme, parçalama içinde)
$\tilde{d}r_{cip}$	Mağaza $c$ 'nin $i$ yenilenen ürün için $p$ periyodundaki talebi

$d\tilde{u}_{usp}$	Tedarikçi $s$ 'nin $u$ yarı mamul/yararlı için $p$ periyodundaki ürün talebi
$in_i$	Ürün $i$ için birim muayene maliyeti
$h_i^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $i$ ürünü için birim taşıma maliyeti
$h_h^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $h$ zararlı malzeme için birim taşıma maliyeti
$h_u^t$	Taşıyıcı $t$ 'nin $u$ yarı mamul/yararlı malzeme için birim taşıma maliyeti
$pp_{ij}$	Toplama merkezlerindeki $i$ ürününün $j$ hasar durumu yüzdesi
$pu_{iju}$	$j$ hasar durumundaki $i$ ürün için $u$ yarı mamul/yararlı malzeme ağırlık yüzdesi
$ph_{ijh}$	$j$ hasar durumundaki $i$ ürün için $h$ zararlı malzeme ağırlık yüzdesi
$mr_u^s$	Üretici $s$ 'nin $u$ yarı mamul/yararlı malzemenin marjinal kazanç değeri
$mh_h^l$	Bertaraf merkezi $l$ 'nin $h$ zararlı malzeme için birim bertaraf maliyeti
$mu_u$	$u$ yarı mamul/yararlı malzemenin birim satış fiyatı
$minr_{ip}$	Ürün $i$ için $p$ periyodundaki minimum geri kazanım oranı
$mins_i$	Ürün $i$ için minimum toplama miktarı
$sl_{ij}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü için demontaj verimlilik oranı
$y_i^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $i$ ürünü için yenileme kapasitesi
$tcr_c^r$	Mağaza $c$ ile geri kazanım merkezi $r$ arasındaki mesafe
$tkr^{kr}$	Toplama merkezi $k$ ile geri kazanım merkezi $r$ arasındaki mesafe
$tlr^{lr}$	Bertaraf merkezi $l$ ile geri kazanım merkezi $r$ arasındaki mesafe
$tsr^{sr}$	Tedarikçi $s$ ile geri kazanım merkezi $r$ arasındaki mesafe
$pr_i^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin ürün $i$ için minimum yenileme miktarı
$ca_{ic}$	Mağaza $c$ 'nin ürün $i$ için toplama kapasitesi
$s_i$	Ürün $i$ için birim stok maliyeti
$eb_i$	Ürün $i$ için yoksatma maliyeti
$eb_u$	$u$ yarı mamul/yararlı için yoksatma maliyeti



### Karar Değişkenleri

$WC_{cijp}^{tr}$	Mağaza $c$ 'nin geri kazanım merkezi $r$ 'den $p$ periyodundaki mağazalardan toplanan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü kullanılarak $t$ taşıyıcısı ile karşılanan $i$ yenilenen ürün talep miktarı
$WK_{cijp}^{tr}$	Mağaza $c$ 'nin $p$ periyodundaki geri kazanım merkezi $r$ 'den toplama merkezlerinden toplanan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü kullanılarak $t$ taşıyıcısı ile karşılanan $i$ yenilenen ürün talep miktarı
$ZK_{ip}^{tkr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $p$ periyodundaki toplama merkezi $k$ 'dan $t$ taşıyıcı kanalı ile satın aldığı $i$ ürün miktarı
$ZC_{ijp}^{tcr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $p$ periyodundaki mağaza $c$ 'den $t$ taşıyıcı kanalı ile satın aldığı $j$ hasar durumundaki $i$ ürün miktarı
$XC_{ijp}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $p$ periyodundaki mağazalardan $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü alarak karşıladığı demontaj miktarı
$XK_{ijp}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $p$ periyodundaki toplama merkezlerinden $j$ hasar durumundaki $i$ ürünü alarak karşıladığı demontaj miktarı
$XKU_{up}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $p$ periyodundaki toplama merkezlerinden alınan ürünlerden elde ettiği $u$ yarı mamul/yararlı malzeme miktarı
$XCU_{up}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $p$ periyodundaki mağazalardan alınan ürünlerden elde ettiği $u$ yarı mamul/yararlı malzeme miktarı
$XKH_{hp}^{trl}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $p$ periyodundaki bertaraf merkezi $l$ 'ye $t$ taşıyıcı aracılığı ile toplama merkezlerinden aldığı ürünlerden elde ettiği $h$ zararlı malzeme gönderim miktarı
$XCH_{hp}^{trl}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $p$ periyodundaki bertaraf merkezi $l$ 'ye $t$ taşıyıcı aracılığı ile mağazalardan aldığı ürünlerden elde ettiği $h$ zararlı malzeme gönderim miktarı
$XY_{up}^{tsr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'den $p$ periyodundaki üretici $s$ 'nin $t$ taşıyıcı aracılığı ile karşılanan $u$ yarı mamul/yararlı malzeme talep miktarı
$XS_{up}^r$	Geri kazanım merkezi $r$ 'den $p$ periyodundaki ikincil pazarlara satılan $u$ yarı mamul/yararlı malzeme miktarı
$YR_{cij}^r$	1: mağaza $c$ 'nin $p$ periyodundaki $j$ hasar durumundaki $i$ yenilenen ürün talebi geri kazanım merkezi $r$ 'den $t$ taşıyıcısı yolu ile taşınması durumunda; 0 diğer durumlarda.
$O_{ip}^{tkr}$	1: $p$ periyodundaki $i$ ürünü geri kazanım merkezi $r$ 'den $t$ taşıyıcısı yolu ile taşınması durumunda; 0 diğer durumlarda.
$dr_{cip}^+$	$c$ mağazasının yenilenen ürün $i$ için $p$ periyodundaki talep fazlası üretim miktarı
$dr_{cip}^-$	$c$ mağazasının yenilenen ürün $i$ için $p$ periyodundaki yok satma miktarı
$du_{usp}^-$	$s$ tedarikçisinin $u$ yarı mamul/yararlı ürün için $p$ periyodundaki yok satma miktarı
$du_{usp}^+$	$s$ tedarikçisinin $u$ yarı mamul/yararlı ürün için $p$ periyodundaki talep fazlası üretim miktarı
$SK_{ijp}^{kr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $p$ periyodundaki toplama merkezi $k$ 'dan alıp elinde bulundurduğu $j$ hasar durumundaki $i$ ürün miktarı

$SC_{ijp}^{cr}$	Geri kazanım merkezi $r$ 'nin $p$ periyodundaki mağaza $c$ 'den alıp elinde bulundurduğu $j$ hasar durumundaki $i$ ürün miktarı
$RI_{ip}$	Yenilenen ürün $i$ satışından $p$ periyodunda elde edilen toplam gelir
$RU_{up}$	$u$ yarı mamul/yararlı ürün satışından $p$ periyodunda elde edilen toplam gelir ( <i>marjinal gelir+satış geliri</i> )
$CTR_{ip}$	Kullanılmış/kullanım ömrü dolmuş ve yenilenen ürün $i$ için $p$ periyodundaki tersine lojistik maliyeti ( <i>taşıma maliyeti</i> )
$CIR_{ip}$	Kullanılmış/kullanım ömrü dolmuş ve yenilenen ürün $i$ için $p$ periyodundaki tersine tedarik zinciri maliyeti ( <i>satın alma+muayene+yenileme+demontaj maliyeti</i> )
$CU_{up}$	$u$ yarı mamul/yararlı ürün için $p$ periyodundaki toplam maliyet ( <i>taşıma maliyeti</i> )
$CH_{hp}$	$h$ zararlı malzemeler için $p$ periyodundaki toplam maliyet ( <i>atık bertaraf+taşıma maliyeti</i> )
$CY_{ip}$	$i$ ürünü için $p$ periyodundaki toplam yok satma maliyeti
$CI_{ip}$	$i$ ürünü için $p$ periyodundaki toplam stok maliyeti
$CF_{up}$	$u$ yarı mamul/yararlı ürün için $p$ periyodundaki toplam yok satma maliyeti

### **Karma Tamsayı Programlama Modeli**

$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} (RI_{ip} - CTR_{ip} - CIR_{ip} - CY_{ip} - CI_{ip}) + \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} (RU_{up} - CU_{up} - CF_{up}) \quad (6.1) \\ & - \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} (CH_{hp}) \end{aligned}$$

### **Hesaplamalar**

$$RI_{ip} = \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \tilde{e}_i (WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (6.2)$$

$$RU_{up} = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} mr_u^s XY_{up}^{tsr} + \sum_{r \in R} mu_u XS_{up}^r \quad \forall u \in U, p \in P \quad (6.3)$$

$$CTR_{ip} = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} h_i^t tkr^{kr} ZK_{ip}^{tkr} + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} h_i^t tcr^{cr} (ZC_{ijp}^{tr} + WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} CIR_{ip} = & \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} g\tilde{c}_{ij} ZC_{ijp}^{tr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} g\tilde{k}_{ik} ZK_{ip}^{tkr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} in_i ZK_{ip}^{tkr} \\ & + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} q\tilde{r}_{ijr} (WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr}) + \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} q\tilde{d}_{ir} (XC_{ijp}^r + XK_{ijp}^r) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (6.5) \end{aligned}$$

$$CU_{up} = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} tsr^{sr} h_u^t XY_{up}^{tsr} \quad \forall u \in U, p \in P \quad (6.6)$$

$$CH_{hp} = \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} h_h^t tlr^{lr} (XCH_{hp}^{trl} + XKH_{hp}^{trl}) + \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} mh_h^l (XCH_{hp}^{trl} + XKH_{hp}^{trl}) \quad \forall h \in H, p \in P \quad (6.7)$$

$$CY_{ip} = \sum_{c \in C} e b_i dr_{cip}^- \quad \forall i \in I, p \in P \quad (6.8)$$

$$CI_{ip} = \sum_{c \in C} s_i dr_{cip}^+ + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} s_i SK_{ijp}^{kr} + \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} s_i SC_{ijp}^{cr} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (6.9)$$

$$CF_{up} = \sum_{s \in S} e b_u du_{usp}^- \quad \forall u \in U, p \in P \quad (6.10)$$

### Kısıtlar

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} (WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr}) + dr_{cip}^- - dr_{cip}^+ = d\tilde{r}_{cip} \quad \forall c \in C, i \in I, p \in P \quad (6.11)$$

$$WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr} \geq YR_{cijp}^{tr} \quad \forall t \in T, r \in R, c \in C, i \in I, j \in J, p \in P \quad (6.12)$$

$$WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr} \leq M \cdot YR_{cijp}^{tr} \quad \forall t \in T, r \in R, c \in C, i \in I, j \in J, p \in P \quad (6.13)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} (WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr}) \leq y_i^r \quad \forall r \in R, i \in I, p \in P \quad (6.14)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} ZK_{ip}^{tkr} = \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \tilde{W}_{ikp} O_{ip}^{tkr} \quad \forall i \in I, p \in P, k \in K \quad (6.15)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} ZK_{ip}^{tkr} + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} ZC_{ijp}^{tcr} \geq \min s_i \quad \forall i \in I \quad (6.16)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} ZC_{ijp}^{tcr} \leq ca_{ic} \quad \forall c \in C, i \in I \quad (6.17)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr}) - \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} pr_i^r YR_{cijp}^{tr} \geq 0 \quad \forall i \in I, r \in R, p \in P \quad (6.18)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{c \in C} ZC_{ijp}^{tcr} + \sum_{c \in C} SC_{ijp-1}^{cr} = \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} WC_{cijp}^{tr} + XC_{ijp}^r + \sum_{c \in C} SC_{ijp}^{cr} \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R, p \in P \quad (6.19)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XC_{ijp}^r sl_{ij}^r \tilde{a}_i pu_{iju} = XCU_{up}^r \quad \forall r \in R, u \in U, p \in P \quad (6.20)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XC_{ijp}^r sl_{ij}^r \tilde{a}_i ph_{ijh} = \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} XCH_{hp}^{trl} \quad \forall r \in R, h \in H, p \in P \quad (6.21)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} pp_{ij} ZK_{ip}^{tkr} + \sum_{k \in K} SK_{ijp-1}^{kr} = \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} WK_{cijp}^{tr} + XK_{ijp}^r + \sum_{k \in K} SK_{ijp}^{kr} \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R, p \in P \quad (6.22)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XK_{ijp}^r sl_{ij}^r \tilde{a}_i pu_{iju} = XKU_{up}^r \quad \forall r \in R, u \in U, p \in P \quad (6.23)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XK_{ijp}^r sl_{ij}^r \tilde{a}_i ph_{ijh} = \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} XKH_{hp}^{trl} \quad \forall r \in R, h \in H, p \in P \quad (6.24)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{s \in S} XY_{up}^{tsr} + XS_{up}^r = XCU_{up}^r + XKU_{up}^r \quad \forall u \in U, r \in R, p \in P \quad (6.25)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} XY_{up}^{tsr} + du_{usp}^- - du_{usp}^+ = d\tilde{u}_{usp} \quad \forall u \in U, s \in S, p \in P \quad (6.26)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{r \in R} (XC_{ijp}^r + XK_{ijp}^r) + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} (WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr}) \geq$$

$$\left( \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} ZC_{ijp}^{tcr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} ZK_{ip}^{tkr} \right) \min r_{ip} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (6.27)$$

$$SC_{ij0}^{cr} = 0 \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R, c \in C \quad (6.28)$$

$$SK_{ij0}^{kr} = 0 \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R, k \in K \quad (6.29)$$

$$WC_{cijp}^{tr}, WK_{cijp}^{tr}, ZK_{ip}^{tkr}, ZC_{ijp}^{tcr}, XC_{ijp}^r, XK_{ijp}^r, XKU_{up}^r, XCU_{up}^r, XKH_{hp}^{trl}, XCH_{hp}^{trl}, XY_{up}^{tsr}, XS_{up}^r,$$

$$SC_{ijp}^{cr}, SK_{ijp}^{kr}, dr_{cip}^+, dr_{cip}^-, dr_{usp}^-, dr_{usp}^+ \geq 0 \quad (6.30)$$

$$YR_{cijp}^{tr}, O_{ip}^{tkr} \in [0,1] \quad \forall c \in C, i \in I, j \in J, k \in K, t \in T, r \in R, u \in U, s \in S, h \in H, l \in L, p \in P$$

Amaç fonksiyonu (6.1), tersine tedarik zinciri ağ tasarımında gelir elde edilen ürün grubu satışı ve yarı mamul veya yararlı malzeme satışlarından toplanan ve satışı yapılan ürün gruplarına göre muayene, parçalama, yenileme ve taşıma maliyetleri ile zararlı malzemelerin taşınması ve yok edilmesi için gerekli maliyetlerin yanı sıra yok satma ve stok maliyetlerinin çıkarılması sonucu bulunan toplam kazancın maksimizasyonudur. Denklem (6.2), yenilenen ürün satışlarından elde edilen toplam geliri hesaplar. Denklem (6.3), üretilen yararlı malzemelerin satışından elde edilen geliri hesaplar. Denklem (6.4), tersine lojistik maliyetleri olan toplama merkezi ve mağazalarda toplanan kullanılmış veya atık ürünlerle, yenilenen ürünlerin taşıma maliyetini tanımlar. Denklem (6.5), tersine maliyetlerden toplama merkezi ve mağazalarda toplanan kullanılmış veya atık ürünlerle, yenilenen ürünlerin satın alma, muayene, yenileme ve parçalama maliyetlerini tanımlar. Denklem (6.6), üretilen yarı mamul ve yararlı malzemelerin üreticilere gönderme maliyetlerini hesaplar. Denklem (6.7), üretilen zararlı malzemelerin yok etme ve taşıma maliyetlerini hesaplar. Denklem (6.8), yenilenen ürünler için toplam yok satma maliyetlerini hesaplar. Denklem (6.9), yenilenen ve toplanan ürünler için toplam stok maliyetini hesaplar. Denklem (6.10), üretilen yarı mamul ve yararlı malzemelerin toplam yok satma maliyetlerini hesaplar. Denklem (6.11), (6.12), (6.13) yenilenen ürün üretim ve talep kısıtlarıdır. Denklem (6.14), geri kazanım merkezlerinin kapasite kısıtıdır. Denklem (6.15), toplama merkezlerindeki ürün dengesini tanımlar. Kısıt (6.16), yönetmelikte yer alan üreticilerin ürün gruplarına göre minimum geri toplama hedeflerini tanımlar. Kısıt (6.17), mağazaların toplanan ürünler için kapasite kısıtını tanımlar. Kısıt (6.18) geri kazanım merkezlerinin bir üründen minimum kabul edilebilir yenileme

miktarlarını tanımlar. Kısıt (6.19) mağazalardan alınan kullanılmış veya atık ürünlerin stok dengesini tanımlar. Denklem (6.20), (6.21) geri kazanım merkezlerindeki mağazalardan alınan kullanılmış ürün gruplarına göre yarı mamul veya yararlı malzeme ve zararlı malzeme dönüşüm değerlerini tanımlar. Kısıt (6.22) toplama merkezlerinden alınan kullanılmış veya atık ürünlerin stok dengesini tanımlar. Kısıt (6.23), (6.24) geri kazanım merkezlerindeki ürün gruplarına göre yarı mamul veya yararlı malzeme ve zararlı malzeme dönüşüm değerlerini tanımlar. Kısıt (6.25) ve (6.26) üreticilerin yarı mamul veya yararlı malzeme ürün dönüşüm dengesi ve talep kısıtlarıdır. Kısıt (6.27), ürün gruplarına göre minimum geri dönüşüm kısıdını tanımlar. Kısıt (6.28) ve (6.29) koordinasyon merkezlerinden ve mağazalardan alınıp elde bulundurulacak stok miktarlarının 0. periyotta olmadığını tanımlar. Son olarak Kısıt (6.30) değişkenlerin doğasını tanımlar.

#### 6.4 Model Dönüşümü

Durulaştırma yöntemi olarak Bölüm 4.1’de açıklanan parametrelerin bulanık olduğu durumlarda beklenen aralıkların karşılaştırılması yolu ile bulanık sayıların sıralama yöntemi kullanılmıştır. Buna göre hesaplama ve kısıtlar şu şekilde değiştirilmiştir. Denklem (6.2) ve (6.5) yerine denklem (6.31) ve (6.32) şeklinde yeniden yazılmıştır.

$$RI_{ip} = \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \left( \frac{e_i^p + 2e_i^m + e_i^0}{4} \right) (WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (6.31)$$

$$CIR_{ip} = \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \left( \frac{gc_{ij}^p + 2gc_{ij}^m + gc_{ij}^0}{4} \right) ZC_{ijp}^{tr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \left( \frac{gk_{ik}^p + 2gk_{ik}^m + gk_{ik}^0}{4} \right) ZK_{ip}^{tr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} in_i ZK_{ip}^{tr} + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \left( \frac{gr_{ijr}^p + 2gr_{ijr}^m + gr_{ijr}^0}{4} \right) (WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr}) + \quad (6.32)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \left( \frac{qd_{ir}^p + 2qd_{ir}^m + qd_{ir}^0}{4} \right) (XC_{ijp}^r + XK_{ijp}^r) \quad \forall i \in I, p \in P$$

Kısıt (6.11), (6.15), (6.20), (6.21), (6.23), (6.24) ve (6.26) sırası ile (6.33), (6.34), (6.35), (6.36), (6.37), (6.38) ve (6.39) şeklinde yazılmıştır.

$$\sum_{i \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} (WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr}) + dr_{cip}^- - dr_{cip}^+ \geq \left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{dr_{cip}^m + dr_{cip}^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{dr_{cip}^p + dr_{cip}^m}{2} \right]$$

$$\forall c \in C, i \in I, p \in P$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} (WC_{cijp}^{tr} + WK_{cijp}^{tr}) + dr_{cip}^- - dr_{cip}^+ \leq \left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{dr_{cip}^m + dr_{cip}^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{dr_{cip}^p + dr_{cip}^m}{2} \right] \quad (6.33)$$

$$\forall c \in C, i \in I, p \in P$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{r \in R} ZK_{ip}^{tkr} \geq \sum_{i \in T} \sum_{r \in R} \left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{w_{ikp}^m + w_{ikp}^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{w_{ikp}^p + w_{ikp}^m}{2} \right] O_{ip}^{tkr} \quad \forall i \in I, p \in P, k \in K$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{r \in R} ZK_{ip}^{tkr} \leq \sum_{i \in T} \sum_{r \in R} \left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{w_{ikp}^m + w_{ikp}^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{w_{ikp}^p + w_{ikp}^m}{2} \right] O_{ip}^{tkr} \quad \forall i \in I, p \in P, k \in K \quad (6.34)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XC_{ijp}^r sl_{ij}^r \left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] pu_{iju} \geq XCU_{up}^r \quad \forall r \in R, u \in U, p \in P$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XC_{ijp}^r sl_{ij}^r \left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] pu_{iju} \leq XCU_{up}^r \quad \forall r \in R, u \in U, p \in P \quad (6.35)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XC_{ijp}^r sl_{ij}^r \left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] ph_{ijh} \geq \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} XCH_{hp}^{trl} \quad \forall r \in R, h \in H, p \in P$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XC_{ijp}^r sl_{ij}^r \left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] ph_{ijh} \leq \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} XCH_{hp}^{trl} \quad \forall r \in R, h \in H, p \in P \quad (6.36)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XK_{ijp}^r sl_{ij}^r \left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] pu_{iju} \geq XKU_{up}^r \quad \forall r \in R, u \in U, p \in P$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XK_{ijp}^r sl_{ij}^r \left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] pu_{iju} \leq XKU_{up}^r \quad \forall r \in R, u \in U, p \in P \quad (6.37)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XK_{ijp}^r sl_{ij}^r \left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] ph_{ijh} \geq \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} XKH_{hp}^{trl} \quad \forall r \in R, h \in H, p \in P$$

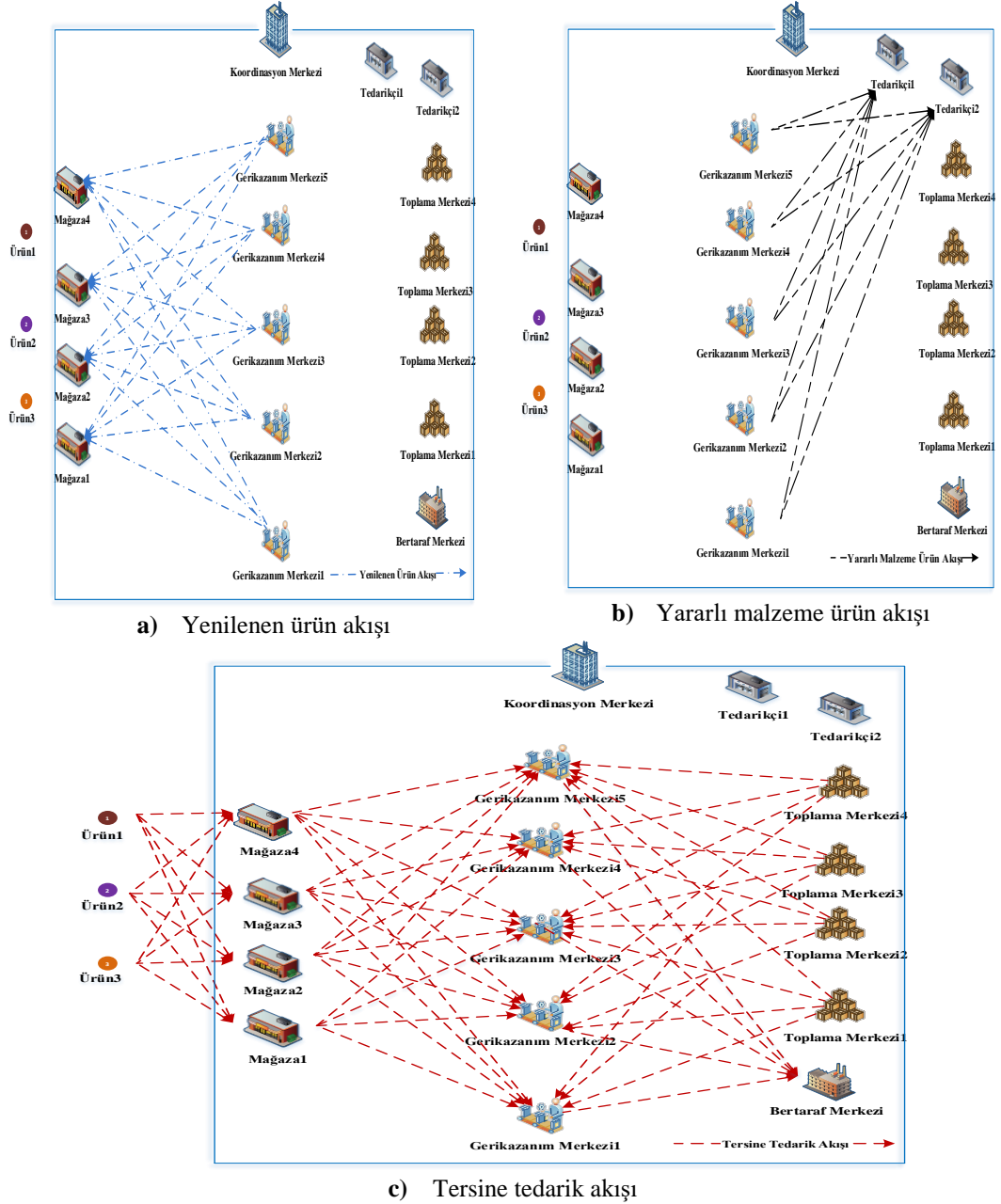
$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} XK_{ijp}^r sl_{ij}^r \left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^m + a_i^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{a_i^p + a_i^m}{2} \right] ph_{ijh} \leq \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} XKH_{hp}^{trl} \quad \forall r \in R, h \in H, p \in P \quad (6.38)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{r \in R} XY_{up}^{tsr} + du_{usp}^- - du_{usp}^+ \geq \left[ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{du_{usp}^m + du_{usp}^0}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{du_{usp}^p + du_{usp}^m}{2} \right] \quad \forall u \in U, s \in S, p \in P$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{r \in R} XY_{up}^{tsr} + du_{usp}^- - du_{usp}^+ \leq \left[ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{du_{usp}^m + du_{usp}^0}{2} + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{du_{usp}^p + du_{usp}^m}{2} \right] \quad \forall u \in U, s \in S, p \in P \quad (6.39)$$

## 6.5 Örnek Uygulama

Örnek uygulamada üç ürün, iki tedarikçi, dört mağaza, beş geri kazanım merkezi, dört toplama merkezi, bir zararlı malzeme, sekiz yarı mamul ve yararlı malzeme, bir bertaraf merkezi, üç taşıyıcı ve altı periyot dikkate alınmıştır. Örnek uygulama Şekil 6.2’de yer almaktadır.



Şekil 6.2: Örnek uygulama-koordinasyon merkezli tersine tedarik zinciri ağı

Veri tabloları Tablo 6.1 ile Tablo 6.12 arasında yer almaktadır. Veriler, Model 1’de yer alan yöntemler dikkate alınarak elde edilmiştir. Tablo 6.1’de yenilenen ürün satın alma bedeli ve ürün gruplarına göre ağırlıklar yer almaktadır.

**Tablo 6.1:** Ürün gruplarına göre yenilenen ürün satış bedelleri ve ağırlıklar

$i$	Kriter adı	$\tilde{e}_i$	$\tilde{a}_i$
$i$	Kriter adı	[2,8; 3,1; 3,5]	[8,0; 9,71; 10,0]
2	LCD TV	[2,0; 2,3; 2,5]	[4,0; 4,62; 5,0]
3	LCD	[1,8; 2,0; 2,3]	[6,2; 7,24; 7,8]

Tablo 6.2’de muayene maliyetleri, taşıma maliyetleri, minimum geri dönüşüm oranları, minimum toplama miktarları ve stok ve yok satma maliyetleri yer almaktadır.

**Tablo 6.2:** Ürün gruplarına göre veriler

$i$	$in_i$	$h_i^{t1}$	$h_i^{t2}$	$h_i^{t3}$	$minr_i$	$mins_i$	$eb_i$	$s_i$
1	0,005	0,0012	0,0014	0,0017	0,75	305	3,13	0,0312
2	0,003	0,0006	0,0007	0,0008	0,75	350	2,28	0,0227
3	0,002	0,0008	0,0010	0,0012	0,70	300	2,03	0,0202

Tablo 6.3’te periyotlara göre yenilenen ürün talepleri ve mağaza kapasiteleri yer almaktadır.



**Tablo 6.3:** Periyotlara göre yenilenen ürün talep ve mağaza kapasiteleri

$c$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	
$\tilde{d}r_{cip1}$	1	[20; 30; 40]	[40; 50; 60]	[10; 20; 30]
	2	[30; 40; 50]	[20; 30; 40]	[30; 40; 50]
	3	[20; 30; 40]	[40; 50; 60]	[0; 10; 20]
	4	[10; 20; 30]	[10; 20; 30]	[5; 10; 15]
$\tilde{d}r_{cip2}$	1	[0; 10; 20]	[20; 30; 40]	[10; 20; 30]
	2	[0; 0; 0]	[10; 20; 30]	[0; 0; 0]
	3	[30; 40; 50]	[30; 40; 50]	[30; 40; 50]
	4	[0; 0; 0]	[0; 0; 0]	[5; 10; 15]
$\tilde{d}r_{cip3}$	1	[10; 10; 10]	[10; 10; 10]	[5; 10; 15]
	2	[20; 30; 40]	[0; 0; 0]	[0; 10; 20]
	3	[0; 0; 0]	[20; 40; 60]	[10; 10; 10]
	4	[5; 10; 15]	[5; 10; 15]	[0; 0; 0]
$\tilde{d}r_{cip4}$	1	[20; 30; 40]	[0; 0; 0]	[10; 15; 25]
	2	[20; 30; 40]	[5; 10; 15]	[10; 10; 10]
	3	[10; 20; 30]	[10; 20; 30]	[0; 0; 0]
	4	[20; 30; 40]	[0; 0; 0]	[10; 20; 30]
$\tilde{d}r_{cip5}$	1	[5; 10; 15]	[10; 20; 30]	[0; 20; 40]
	2	[0; 5; 10]	[10; 20; 30]	[4; 6; 8]
	3	[0; 0; 0]	[0; 0; 0]	[3; 5; 7]
	4	[0; 0; 0]	[10; 20; 30]	[6; 8; 10]
$\tilde{d}r_{cip6}$	1	[10; 20; 30]	[0; 0; 0]	[6; 8; 10]
	2	[20; 30; 40]	[5; 7; 9]	[5; 7; 9]
	3	[10; 20; 30]	[3; 5; 7]	[10; 20; 30]
	4	[10; 20; 30]	[0; 0; 0]	[0; 0; 0]
$ca_{ci}$	1	100	220	70
	2	120	172	130
	3	160	80	200
	4	30	12	20

Periyotlara göre yarı mamul ve yararlı malzeme talep miktarları Tablo 6.4'te gösterilmektedir.

**Tablo 6.4:** Periyotlara göre yarı mamul ve yararlı malzeme talep miktarları

$i$	$s=1$	$s=2$	
$\tilde{d}u_{usp1}$	1	[9; 10; 15]	[9; 10; 15]
	2	[10; 20; 30]	[20; 30; 40]
	3	[20; 30; 35]	[25; 30; 35]
	4	[10; 20; 30]	[20; 30; 60]
	5	[20; 30; 40]	[30; 40; 50]
	6	[10; 15; 25]	[30; 40; 50]
	7	[20; 30; 40]	[0; 0; 0]
	8	[0; 0; 0]	[20; 30; 40]
$\tilde{d}u_{usp2}$	1	[2; 30; 40]	[9; 10; 15]
	2	[10; 20; 30]	[10; 20; 30]
	3	[5; 7; 9]	[25; 30; 35]
	4	[0; 0; 0]	[20; 30; 40]
	5	[20; 30; 40]	[20; 30; 40]
	6	[10; 10; 10]	[0; 0; 0]
	7	[20; 30; 40]	[20; 30; 40]
	8	[20; 20; 20]	[15; 20; 25]
$\tilde{d}u_{usp3}$	1	[0; 0; 0]	[7; 9; 11]
	2	[10; 20; 30]	[5; 8; 10]
	3	[10; 15; 20]	[25; 30; 35]
	4	[20; 30; 40]	[0; 0; 0]
	5	[10; 20; 30]	[20; 30; 40]
	6	[0; 0; 0]	[10; 10; 10]
	7	[20; 20; 20]	[20; 30; 40]
	8	[5; 15; 20]	[10; 15; 20]
$\tilde{d}u_{usp4}$	1	[9; 10; 15]	[10; 11; 12]
	2	[15; 20; 30]	[0; 0; 0]
	3	[2; 6; 10]	[5; 10; 15]
	4	[15; 20; 25]	[0; 0; 0]
	5	[20; 30; 40]	[20; 30; 40]
	6	[0; 0; 0]	[50; 60; 70]
	7	[20; 30; 40]	[20; 30; 40]
	8	[5; 10; 15]	[10; 10; 10]
$\tilde{d}u_{usp5}$	1	[0; 0; 0]	[9; 10; 15]
	2	[10; 10; 10]	[10; 10; 10]
	3	[20; 30; 35]	[10; 20; 35]
	4	[20; 20; 20]	[15; 15; 15]
	5	[20; 30; 40]	[20; 30; 40]
	6	[10; 10; 10]	[20; 25; 30]
	7	[0; 0; 0]	[5; 8; 10]
	8	[4; 6; 10]	[10; 20; 30]
$\tilde{d}u_{usp6}$	1	[8; 9; 10]	[9; 10; 12]
	2	[7; 8; 9]	[10; 11; 12]
	3	[25; 30; 35]	[10; 12; 13]
	4	[0; 0; 0]	[10; 15; 20]
	5	[20; 30; 40]	[20; 30; 40]
	6	[10; 20; 30]	[0; 0; 0]
	7	[20; 30; 40]	[20; 30; 40]
	8	[0; 0; 0]	[30; 40; 50]

Toplama merkezlerindeki ürünlerin kalite yüzdeleri ve geri kazanım merkezlerinin verimlilik oranları Tablo 6.5’de yer almaktadır.

**Tablo 6.5:** Toplama merkezlerindeki ürünlerin kalite yüzdesi ve geri kazanım merkezlerinin verimlilik oranları

$i$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	
$pp_{ij}$	1	0,05	0,10	0,25	0,60
	2	0,15	0,10	0,25	0,50
	3	0,13	0,04	0,20	0,63
$sl_{ij}^{r1}$	1	0,95	0,86	0,75	0,65
	2	0,9	0,85	0,70	0,60
	3	0,9	0,85	0,75	0,70
$sl_{ij}^{r2}$	1	0,95	0,90	0,77	0,66
	2	0,95	0,88	0,71	0,61
	3	0,95	0,89	0,76	0,72
$sl_{ij}^{r3}$	1	0,85	0,82	0,75	0,60
	2	0,80	0,79	0,70	0,55
	3	0,95	0,89	0,76	0,72
$sl_{ij}^{r4}$	1	0,95	0,89	0,76	0,72
	2	0,90	0,85	0,78	0,63
	3	0,80	0,80	0,75	0,62
$sl_{ij}^{r5}$	1	0,95	0,88	0,71	0,61
	2	0,80	0,79	0,70	0,55
	3	0,90	0,85	0,78	0,63

Tablo 6.6 yarı mamul ve yararlı malzemelere göre marjinal kazanç, satış fiyatı, taşıma maliyetleri ve yok satma maliyetlerini içermektedir.

**Tablo 6.6:** Yarı mamul ve yararlı malzemelere göre veriler

$u$	$mr_u^{s1}$	$mr_u^{s2}$	$mu_u$	$h_u^{t1}$	$h_u^{t2}$	$h_u^{t3}$	$eb_u$
1	0,06800	0,03264	0,017	0,0004	0,00048	0,00056	0,03400
2	1,32800	0,63744	0,166	0,0004	0,00048	0,00056	0,66400
3	0,00544	0,00261	0,00136	0,0004	0,00048	0,00056	0,00272
4	0,00320	0,00154	0,0008	0,0004	0,00048	0,00056	0,00160
5	0,00512	0,00246	0,00128	0,0004	0,00048	0,00056	0,00256
6	0,00704	0,00338	0,00176	0,0004	0,00048	0,00056	0,00352
7	0,02400	0,01152	0,006	0,0004	0,00048	0,00056	0,01200
8	0,00400	0,00192	0,001	0,0004	0,00048	0,00056	0,00200

Tablo 6.7 hasar durumlarına göre toplanan ürünlerdeki yarı mamul ve yararlı malzeme ve zararlı malzeme miktarlarını içermektedir.

**Tablo 6.7:** Hasar durumlarına göre yarı mamul/yararlı malzeme ve zararlı malzeme miktarları

$i$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
1	0,088	0,070	0,006	0,0002
$p_{iju1}$ 2	0,0108	0,009	0,005	0,0002
3	0,0108	0,009	0,005	0,0002
1	0	0	0	0
$p_{iju2}$ 2	0,015	0,009	0,005	0,0002
3	0,038	0,02	0,001	0,0002
1	0	0	0	0
$p_{iju3}$ 2	0,05	0,028	0,01	0,003
3	0,045	0,025	0,009	0,002
1	0,035	0,02	0,002	0,001
$p_{iju4}$ 2	0,2316	0,1	0,009	0,006
3	0,239	0,11	0,0092	0,0062
1	0,5263	0,4	0,3	0,1
$p_{iju5}$ 2	0,1212	0,1	0,005	0,0025
3	0,3674	0,3	0,1	0,005
1	0	0	0	0
$p_{iju6}$ 2	0,1623	0,1	0,008	0,003
3	0,0539	0,03	0,001	0,0009
1	0,0185	0,012	0,008	0,006
$p_{iju7}$ 2	0,0152	0,009	0,006	0,004
3	0,011	0,008	0,005	0,003
1	0	0	0	0
$p_{iju8}$ 2	0,1126	0,009	0,006	0,004
3	0,076	0,06	0,04	0,003
1	0,0051	0,0070	0,0080	0,0900
$p_{ijh1}$ 2	0	0	0	0
3	0	0	0	0

Tablo 6.8 zararlı malzemelere göre bertaraf etme ve taşıma maliyetlerini içermektedir.

**Tablo 6.8:** Zararlı malzemelere göre veriler

$h$	$mh_h^1$	$h_h^{t1}$	$h_h^{t2}$	$h_h^{t3}$
1	0,0012	0,0004	0,0008	0,0012

Geri kazanım merkezlerine göre mesafeler Tablo 6.9'da yer almaktadır.

**Tablo 6.9:** Geri kazanım merkezlerine göre mesafeler

$r$	$tc_r^{c1}$	$tc_r^{c2}$	$tc_r^{c3}$	$tc_r^{c4}$	$tl_r^{l1}$	$ts_r^{s1r}$	$ts_r^{s2r}$	$tk_r^{k1r}$	$tk_r^{k2r}$	$tk_r^{k3r}$	$tk_r^{k4r}$
1	173	120	200	158	200	200	100	150	100	140	130
2	287	253	257	125	250	150	70	200	100	80	100
3	150	200	100	120	120	140	70	120	140	170	50
4	130	140	50	140	100	60	80	110	160	165	140
5	120	160	123	240	130	142	150	100	100	160	115

Toplama merkezlerindeki ürünler için elinde bulundurma miktarları ve birim satın alış fiyatları Tablo 6.10’da yer almaktadır.

**Tablo 6.10:** Toplama merkezindeki ürünler için elinde bulundurma miktarları ve birim satın alış fiyatları

$i$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	
$\tilde{W}_{ikp1}$	1	[90; 100; 110]	[30; 40; 50]	[50; 60; 90]	[10; 20; 30]
	2	[100; 120; 140]	[100; 120; 140]	[60; 70; 80]	[20; 30; 40]
	3	[80; 90; 100]	[130; 140; 150]	[110; 182; 190]	[10; 30; 50]
$\tilde{W}_{ikp2}$	1	[70; 80; 90]	[110; 120; 130]	[100; 120; 140]	[3; 5; 7]
	2	[60; 70; 80]	[100; 110; 120]	[60; 70; 80]	[10; 20; 30]
	3	[50; 60; 70]	[90; 100; 110]	[50; 60; 80]	[15; 20; 30]
$\tilde{W}_{ikp3}$	1	[40; 50; 60]	[80; 90; 100]	[40; 60; 80]	[20; 30; 40]
	2	[30; 40; 50]	[80; 90; 100]	[20; 40; 60]	[10; 20; 30]
	3	[20; 30; 40]	[50; 60; 70]	[20; 30; 40]	[10; 20; 30]
$\tilde{W}_{ikp4}$	1	[10; 20; 30]	[40; 50; 60]	[10; 20; 30]	[20; 30; 40]
	2	[40; 50; 60]	[30; 40; 50]	[20; 30; 40]	[10; 20; 30]
	3	[30; 40; 50]	[20; 30; 40]	[10; 20; 30]	[10; 20; 30]
$\tilde{W}_{ikp5}$	1	[9; 10; 15]	[10; 20; 30]	[5; 10; 15]	[3; 5; 7]
	2	[0; 0; 0]	[30; 40; 50]	[60; 70; 80]	[60; 60; 80]
	3	[80; 90; 100]	[30; 40; 50]	[20; 30; 40]	[10; 20; 30]
$\tilde{W}_{ikp6}$	1	[10; 20; 30]	[40; 50; 60]	[40; 50; 60]	[10; 20; 30]
	2	[30; 40; 50]	[20; 30; 40]	[60; 70; 80]	[0; 0; 0]
	3	[80; 90; 100]	[0; 0; 0]	[20; 30; 40]	[1; 3; 5]
$\tilde{g}_{ik}$	1	[0,10; 0,15 0,20]	[0,09; 0,11; 0,15]	[0,02; 0,22; 0,03]	[0,015; 0,02; 0,032]
	2	[0,09; 0,12; 0,15]	[0,08; 0,09; 0,10]	[0,015; 0,022; 0,03]	[0,013; 0,02; 0,032]
	3	[0,05; 0,06; 0,08]	[0,03; 0,40; 0,50]	[0,05; 0,06; 0,08]	[0,03; 0,40; 0,50]

Tablo 6.11 mağazalardan toplanan ürünler için satın alma bedellerini ve geri kazanım merkezlerindeki birim yenileme maliyetlerini içermektedir.

**Tablo 6.11:** Mağazalardan toplanan ürünler için satın alma bedelleri ve geri kazanım merkezlerindeki birim yenileme maliyetleri

$i$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	
$\tilde{g}c_{ij}$	1	[0,40; 0,50; 0,60]	[0,30; 0,40; 0,50]	[0,25; 0,30; 0,40]	[0,10; 0,20; 0,30]
	2	[0,30; 0,40; 0,50]	[0,20; 0,30; 0,40]	[0,15; 0,22; 0,35]	[0,10; 0,14; 0,20]
	3	[0,25; 0,34; 0,40]	[0,15; 0,28; 0,35]	[0,10; 0,20; 0,30]	[0,10; 0,12; 0,20]
$\tilde{q}r_{ijr1}$	1	[0,20; 0,25; 0,30]	[0,40; 0,50; 0,60]	[0,80; 1,00; 1,10]	[1,00; 1,10; 1,30]
	2	[0,10; 0,20; 0,30]	[0,30; 0,40; 0,50]	[0,70; 0,80; 0,90]	[1,00; 1,50; 2,00]
	3	[0,10; 0,17; 0,20]	[0,20; 0,34; 0,40]	[0,55; 0,60; 1,00]	[1,00; 1,20; 1,50]
$\tilde{q}r_{ijr2}$	1	[0,12; 0,22; 0,32]	[0,25; 0,30; 0,35]	[0,75; 0,80; 0,90]	[1,00; 1,00; 1,00]
	2	[0,11; 0,21; 0,31]	[0,20; 0,30; 0,35]	[0,75; 0,80; 0,95]	[1,20; 1,50; 2,00]
	3	[0,15; 0,15; 0,15]	[0,20; 0,30; 0,36]	[0,50; 0,60; 0,75]	[2,00; 2,10; 2,30]
$\tilde{q}r_{ijr3}$	1	[0,21; 0,25; 0,31]	[0,42; 0,51; 0,60]	[0,65; 0,70; 0,80]	[1,00; 1,50; 2,00]
	2	[0,12; 0,21; 0,32]	[0,31; 0,42; 0,53]	[0,72; 0,82; 0,92]	[2,00; 2,10; 3,00]
	3	[0,15; 0,17; 0,20]	[0,21; 0,34; 0,41]	[0,56; 0,61; 0,75]	[1,00; 1,50; 2,00]
$\tilde{q}r_{ijr4}$	1	[0,22; 0,25; 0,32]	[0,30; 0,40; 0,50]	[0,70; 0,80; 0,90]	[1,00; 1,10; 1,30]
	2	[0,12; 0,22; 0,32]	[0,32; 0,42; 0,52]	[0,71; 0,81; 0,91]	[1,20; 1,50; 2,00]
	3	[0,11; 0,14; 0,16]	[0,23; 0,35; 0,42]	[0,54; 0,61; 0,70]	[1,40; 1,60; 1,80]
$\tilde{q}r_{ijr5}$	1	[0,30; 0,40; 0,50]	[0,50; 0,50; 0,50]	[0,71; 0,81; 0,91]	[1,70; 1,90; 2,00]
	2	[0,15; 0,25; 0,35]	[0,32; 0,46; 0,55]	[0,62; 0,72; 0,82]	[1,40; 1,60; 1,80]
	3	[0,13; 0,16; 0,20]	[0,21; 0,36; 0,42]	[0,60; 0,70; 0,75]	[1,20; 1,50; 2,00]

Tablo 6.12 toplanan ürünlere göre demontaj maliyeti, ürün yenileme kapasitesi ile minimum yenileme miktarlarını göstermektedir.

**Tablo 6.12:** Geri kazanım merkezlerine göre veriler

$i$	$r=1$	$r=2$	$r=3$	$r=4$	$r=5$	
$y_i^r$	1	1000	600	500	600	400
	2	1000	800	700	500	500
	3	1000	700	500	600	600
$pr_i^r$	1	30	40	20	30	10
	2	20	30	40	50	10
	3	30	20	20	10	10
$\tilde{q}d_i^r$	1	[0,009; 0,010; 0,020]	[0,010; 0,012; 0,017]	[0,007; 0,008; 0,009]	[0,006; 0,007; 0,008]	[0,005; 0,006; 0,007]
	2	[0,008; 0,009; 0,010]	[0,009; 0,010; 0,012]	[0,005; 0,006; 0,007]	[0,005; 0,006; 0,008]	[0,004; 0,005; 0,007]
	3	[0,006; 0,007; 0,008]	[0,007; 0,008; 0,009]	[0,008; 0,009; 0,010]	[0,009; 0,010; 0,012]	[0,008; 0,010; 0,012]

Koordinasyon merkezli bulanık tersine tedarik zinciri ağının karma tamsayı programlama modeli, 25.737 değişken ve 7.477.650 kısıt içermektedir. Tüm deneyler, ILOG CPLEX 12.7.1 çözücüsü kullanılarak Intel Xeon işlemcili 32 GB Ram ve 64 bit işletim sistemli 3,70 GHz özelliklerine sahip bilgisayarda yapılmış olup çözüm üretilmiştir. Sonuç tabloları Tablo 6.13’de farklı üyelik değerleri ile sınanmıştır. Üyelik (risk) değerleri olarak  $\mu = 0$  gerçekçi olmayan/çok düşük riskli  $\mu = 0,5$  %50 olasılıklı durumları/orta riskli ve  $\mu = 1$  tamamen gerçekçi/çok yüksek riskli çözümleri

yansıtmaktadır. Diğer değerler ara değerlerdir. Üyelik değerlerine göre bulanık değerlerden yenilenen ürün talebi ve mağazalarda bulundurulabilecek maksimum ürün toplama miktarları tam sayı haline dönüştürülerek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Hesaplama esnasında çalışma limiti olarak 10 saat belirlenerek ara değerlerde fark (gap) ile çözüm sağlanmasına olanak sağlanmıştır. Programın standart ayarlarındaki *best bound search* düğüm seçim stratejisi ile çözüm sağlanmıştır. Çözümler Tablo 6.13'te yer almaktadır.  $\mu = 0,5$  için programın *alternate best estimate search* yöntemi ile çözülmüş olup diğer değerler için de bu strateji ile çözüm sağlanmış olup genel olarak farklarda ufak iyileşmeler sağlanmıştır. Tablo 6.14'te bu yonteme bağlı çözümler yer almaktadır.

**Tablo 6.13:** Best bound search stratejisine göre performans ölçüleri

	$\mu = 0$	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,2$	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,6$	$\mu = 0,7$	$\mu = 0,8$	$\mu = 0,9$	$\mu = 1$
(TP)Toplam Kazanç*(\$)	21.119,05	20.912,06	20.181,22	19.852,4	19.263,54	18.776,34	18.410,55	17.598,14	16.904,64	16.380,03	15.143,65
(TI)Toplam gelir*(\$)	43.959,85	43.149,93	41.435,11	40.550,06	39.147,72	37.950,18	37.131,14	35.482,34	34.049,03	33.111,51	29.571,32
<i>i</i> satış geliri RI*(\$)	43.958	43.148,18	41.433,5	40.548,57	39.146,4	37.948,98	37.129,98	35.481,23	34.047,97	33.110,47	29.570,78
<i>u</i> satış geliri RU* (\$)	1,85	1,76	1,61	1,48	1,32	1,2	1,16	1,11	1,05	1,04	0,54
(TC)Toplam Maliyet*(\$)	22.840,80	22.237,87	21.253,89	20.697,65	19.884,19	19.173,84	18.720,59	17.884,2	17.144,39	16.731,49	14.427,66
CTR*(\$)	3585,7	3510,01	3347,59	3263,46	3138,41	3021,63	2969,44	2853,88	2765,77	2676,63	2312,35
CIR*(\$)	18.721	18.217,89	17.408,63	16.942,7	16.262,64	15.679,02	15.280,17	14.575,56	13.934,89	13.617,04	11.711,49
CU*(\$)	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,03
CH*(\$)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CI*(\$)	418,54	402,11	387,54	379,1	368,47	356,27	351,83	333,38	320,11	311,97	275,61
CY*(\$)	10,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CF*(\$)	105,52	107,77	110,04	112,3	114,58	116,84	119,07	121,31	123,55	125,78	128,17
$dr_{cip}^+$	16.135	15.737	15.047	14.618	14.035	13.519	13.193	12.542	11.943	11.649	9.934
$dr_{cip}^-$	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$du_{usp}^-$	1460	1486,43	1512,94	1539,43	1565,95	1592,43	1618,82	1645,23	1671,65	1698,02	1724,89
$du_{usp}^+$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$SK_{ij}^{kr}$	598	201	269	281	395	361	501	402	413	466	376
$SC_{ij}^{cr}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap	%0	%0,5	%1,13	%1,86	%1,97	%0,51	%2,21	%1,27	%0,81	%0	%0

\*(x1000)



**Tablo 6.14:** Alternate best estimate search yöntemine göre performans ölçüleri (x1000)

	$\mu = 0$	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,2$	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,6$	$\mu = 0,7$	$\mu = 0,8$	$\mu = 0,9$	$\mu = 1$
(TP)Toplam Kazanç*(\$)	21.226,17	20.912,06	20.181,22	19.852,64	19.263,72	18.776,34	18.413,57	17.598,14	16.904,63	16.379,77	15.143,65
(TI) Toplam gelir*(\$)	44.035	43.149,93	41.435,11	40.550,06	39.147,74	37.950,18	37.131,14	35.482,34	34.049,02	33.111,51	29.571,32
<i>i</i> satış geliri RI*(\$)	44.033,1	43.148,18	41.433,5	40.548,57	39.146,4	37.948,98	37.129,98	35.481,23	34.047,98	33.110,47	29.570,78
<i>u.</i> satış geliri RU*(\$)	1,9	1,76	1,61	1,48	1,34	1,2	1,16	1,11	1,05	1,04	0,54
(TC)Toplam Maliyet*(\$)	22.808,83	22.237,87	21.253,89	20.697,42	19.884,02	19.173,84	18.717,56	17.884,2	17.144,39	16.731,74	14.427,66
CTR*(\$)	3601,59	3510,1	3347,59	3263,43	3139,17	3021,63	2969,06	2853,82	2765,8	2677,79	2312,35
CIR*(\$)	18.691,37	18.217,8	17.408,63	16.942,7	16.262,71	15.679,02	15.280,1	14.575,62	13.934,86	13.616,08	11.711,49
CU*(\$)	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,03
CH*(\$)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CI (\$)	410,27	402,11	387,54	378,9	367,48	356,27	349,26	333,38	320,11	312,03	275,61
CY*(\$)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CF*(\$)	105,5	107,77	110,04	112,3	114,57	116,84	119,07	121,31	123,56	125,78	128,17
$dr_{cip}^+$	16.164	15.737	15.047	14.619	14.029	13.519	13.193	12.542	11.943	11.649	9.934
$dr_{cip}^-$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$du_{usp}^-$	1459,94	1486,43	1512,94	1539,43	1565,94	1592,43	1618,82	1645,23	1671,66	1698,02	1724,89
$du_{usp}^+$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$SK_{ijp}^{kr}$	<b>179</b>	<b>201</b>	<b>269</b>	<b>270</b>	<b>352</b>	<b>361</b>	<b>374</b>	<b>402</b>	<b>413</b>	<b>468</b>	<b>376</b>
$SC_{ijp}^{cr}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap	%0,12	%0,51	%1,13	%1,34	%1,16	%0	%1,73	%1,16	%1,06	%0	%0

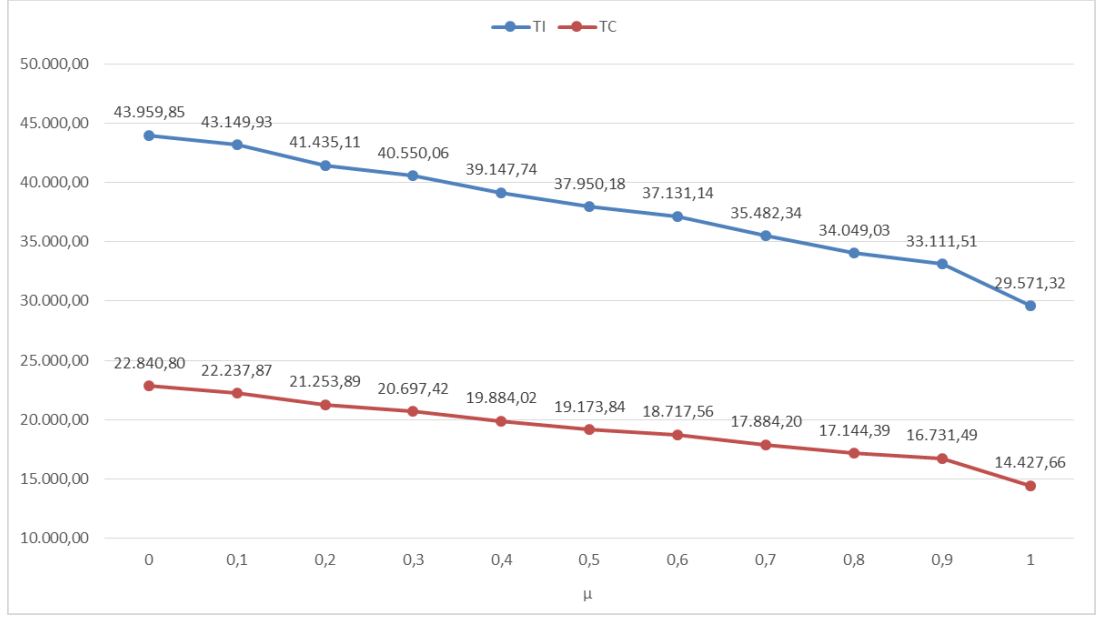
\*(x1000)

İki yöntem dikkate alınarak optimum çözümler için 0, 0,5, 0,9 ve 1 üyelik değerleri için çözüm sağlanmıştır. Aynı zamanda sadece üyelik değeri 0 için yapılan optimum çözümde 5 adet yenilenen ürün talebi karşılanamamış ve yok satma bedeline katlanılmıştır. Çözümün zorlaşmasında özellikle ağırlık parametresinin bulanık olması ve aralık değerlerinin genişlediği çözümlerde  $u$  yararlı malzeme talep ve satışların sağlanmasında zorluk yaşandığı görülmektedir. Üyelik değerleri olarak  $\mu = 0$ ,  $\mu = 0,5$  ve  $\mu = 1$  için optimum çözümler Tablo 6.15’de yer almaktadır. İki yöntemin en iyi değerleri dikkate alınarak üyelik değerlerine göre toplam gelir ve toplam maliyetlerdeki değişimler Şekil 6.3’de yer almaktadır.

**Tablo 6.15:** Performans ölçüleri (x1000)

	$\mu = 0$		$\mu = 0,5$		$\mu = 1$	
(TP) Toplam Kazanç*(\$)	21.119,05	100,00% **	18.776,34	100,00% **	15.143,65	100,00% **
(TI) Toplam gelir*(\$)	43.959,85	208,15 %	37.950,18	202,12%	29.571,32	195,27%
$i$ satış geliri RI*(\$)	43.958,00	208,14%	37.948,98	202,11%	29.570,78	195,27%
$u$ . satış geliri RU*(\$)	1,85	0,009%	1,20	0,006%	0,54	0,004%
(TC) Toplam Maliyet*(\$)	22.840,80	108,15%	19.173,84	102,12%	14.427,66	95,27%
CTR*(\$)	3585,70	16,98%	3021,63	16,09%	2312,35	15,27%
CIR*(\$)	18.721,00	88,65%	15.679,02	83,50%	11.711,49	77,34%
CU*(\$)	0,11	0,0005%	0,07	0,0004%	0,03	0,0002%
CH*(\$)	0	0%	0	0%	0	0%
CI*(\$)	418,54	1,98%	356,27	1,90%	275,61	1,82%
CY*(\$)	10,13	0,05%	0	0%	0	0%
CF*(\$)	105,52	0,5%	116,84	0,62%	128,17	0,85%
$dr_{cip}^+$	16.135		13.519		9.934	
$dr_{cip}^-$	5		0		0	
$du_{usp}^-$	1460		1592,43		1724,89	
$du_{usp}^+$	0		0		0	
$SK_{ijp}^{kr}$	598		361		376	
$SC_{ijp}^{cr}$	0		0		0	

\* x1000, \*\* Hesaplama (Performans göstergesi/Toplam kazanç) x 100.



Şekil 6.3: Üyelik değerlerine göre çözümler (x1000\$)

Tablo 6.13, Tablo 6.15 ve Şekil 6.3 incelendiğinde üyelik değerleri daha gerçekçi sayılara yaklaştıkça elde edilen kazanç değerinin azaldığı görülmektedir.  $\mu = 0$  değerine göre  $\mu = 1$  değerindeki toplam kazanç farkı *best bound search* yöntemine göre %28,29 oranında iken *alternate best estimate search* yöntemine göre %28,66 oranında bir azalma olduğu görülmektedir. Şekil 6.3 incelendiğinde,  $\mu = 0$  değerine göre  $\mu = 1$  değerindeki toplam gelir farkı %32,73 toplam maliyet farkı ise %36,83 olarak görülmektedir. Sonuç olarak  $\mu = 1$  değerine yaklaştıkça toplam kazanç değerinin yanı sıra toplam gelir ve maliyetlerinde düştüğü görülmektedir. Aynı zamanda özellikle taşıma maliyetleri ağda yer alan aktörler arasında paylaştırılarak da üretici rolündeki geri kazanım merkezlerinin maliyetlerinde indirim sağlanarak geri dönüşüm ve yenileme süreçleri desteklenebilir. Örneğin;  $\mu = 1$  değeri için taşıma maliyeti, toplam maliyetin %15,27'lik bir değerdir.

$\mu = 0$  değerindeki optimum çözüm hariç tüm çözümlerde toplam  $WC_{cij}^{tr}$  değerinin 1314 olduğu ayrıntılı incelemelerde görülmüş olup bu miktarda yenilenen ürün talebinin mağazalardan alınan 1 ve 2 hasar durumundaki ürünler ile karşılandığı görülmüştür. Bunun yanı sıra geri kazanım merkezlerindeki kapasitelerin çoğunlukla daha karlı olması nedeni ile yenilenen ürünler için kullanıldığı ve demontaj için daha düşük kapasitede çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu nedenle yararlı malzeme talepleri cüzzî miktarlarda karşılanmış olup taşıma maliyetlerinin yüksekliği ve kapasiteler nedeni ile demontaja giren parçaların ikincil pazarlarda satıldığı

görülmektedir. Tüm çözümlerde  $SC_{ijp}^{cr}$  değerinin 0 olması nedeni ile mağazalardan alınan kaliteli ürünlerin tamamının kullanıldığı ve işlenmeden depoda tutulmadığı görülmektedir.

Gerçekçi/çok yüksek riskli çözüm değerlerini yansıtan  $\mu = 1$  değeri için bazı talep karşılama yollarını ayrıntılı incelediğimizde Tablo 6.16 ile Tablo 6.17’de çözümler yer almaktadır.

**Tablo 6.16:**  $\mu = 1$  için talep karşılama yolları  $WC_{cijp}^{tr}$

$c$	$i$	$j$	$t$	$r$	$p$	Adet
3	3	1	1	4	3	232
3	1	1	1	4	2	180
3	2	1	1	4	5	160
3	1	1	1	4	4	120
3	2	1	1	4	4	110
3	2	1	1	4	3	100
3	2	1	1	4	6	60
3	1	1	1	4	5	60
3	1	1	1	4	1	40
2	3	1	1	1	1	40
3	2	1	1	3	6	30
2	2	1	1	1	5	24
4	3	1	1	2	4	23
3	3	1	1	4	6	20
1	3	1	1	4	1	20
2	3	1	1	1	4	17
3	3	1	1	4	5	16
4	3	1	1	4	1	10
4	1	2	1	2	4	10
3	3	1	1	4	1	10
4	3	1	1	4	5	8
1	3	1	1	4	6	8
2	3	1	1	4	6	7
2	3	1	1	4	5	6
2	3	2	1	1	2	3

**Tablo 6.17:**  $\mu = 1$  için talep karşılanma yolları  $XY_{up}^{tsr}$ 

$u$	$t$	$s$	$r$	$p$	Miktar (kg)
2	1	1	3	1	0,085
1	1	1	3	1	0,085
2	1	1	2	2	0,065
1	1	1	2	2	0,065
2	1	1	3	2	0,050
1	1	1	3	2	0,050
2	1	1	3	6	0,035
2	1	1	3	4	0,035
1	1	1	3	6	0,035
1	1	1	3	4	0,035
2	1	1	3	3	0,025
1	1	2	3	3	0,025
2	1	1	3	5	0,010
1	1	2	3	5	0,010

Çözümler incelendiğinde modelin karlılık ve hedefler nedeni ile demontaj yerine yenileme kararlarını aldığı görülmektedir. Tablo 6.15’de de görüldüğü gibi  $\mu = 1$  değeri için 9934 adet yenilenen ürün talep fazlası olarak depolanmaktayken 1724,89 birimlik yararlı malzeme için yok satma bedeline katlanılmaktadır. Aynı zamanda yenileme kapasite kısıtı nedeni ile 376 adet toplama merkezlerinden alınan ürün herhangi bir işleme tabi tutulmadan depolanmaktadır.  $WC_{cij}^{tr}$  değeri 1314  $WK_{cij}^{tr}$  değeri toplam 9757 ve  $XY_{up}^{tsr}$  cüzzü bir değer olan 0,61 birimlik talebin sadece yararlı malzeme 1 ve 2 için karşılandığı Tablo 6.17’de görülmektedir. Yenilenen ürün taleplerinin genellikle mağazalardan toplanan hasar durumu 1 olan ürünler ile karşılandığı Tablo 6.16’de görülmektedir. Toplama merkezlerinden daha düşük kaliteli ürünlerin (genellikle 4 hasar durumundaki ürünler) demontaj işleminde değerlendirildiği ya da anlaşma yapılan toplama merkezlerinden tüm ürünlerin alınması zorunluluğu nedeni ile işlem yapılmadan stok maliyetine katlanıldığı görülmektedir.

### 6.6 Model Sonuçları ve Modelin Çalışma Alanına Katkısı-Model 3

Çalışmada, hasar durumlarını dikkate alan ve yönetmelikte yer alan toplama ve geri dönüşüm hedefleri ile kurulması zorunlu olan koordinasyon merkezinin kurulması sonucu bulanık tersine tedarik zinciri ağının nasıl kurulması ve yönetilmesi gerektiğine

dair karar desteği sağlanmaya çalışılmış olup örnek uygulama ile sonuçlar yorumlanmaya çalışılmıştır. Model 1'deki gibi literatürden farklı olarak, farklı kalite seviyeleri, satışlar üzerinden minimum e-atık toplama hedefi ve belirsizlik modelde yer almaktadır. Yine Model 1'den farklı olarak Model 3, yok satma miktarları dikkate alınarak çok periyotlu olarak kurgulanmış ve farklı üyelik değerlerine göre sınıanmıştır.

Sonuç olarak, koordinasyon merkezini merkezi karar alıcı olarak değerlendirilen model, farklı üyelik değerlerine göre sınıanmış olup farklı arama stratejilerine göre çözümler incelenmiş ve yorumlanmıştır. yelik değerleri daha gerçekçi/çok yüksek riskli sayılara yaklaştıca elde edilen kazanç değerinin yanı sıra toplam gelir ve maliyetlerinin düştüğü görülmektedir. Geri kazanım merkezlerindeki kapasitelerin çoğunlukla daha karlı olması nedeni ile yenilenen ürünler için kullanıldığı ve demontaj için daha düşük kapasitede çalışma yapıldığı görülmektedir. Yenilenen rn taleplerinin genellikle mağazalardan toplanan hasar durumu 1 olan ürünler ile karşılandığı, toplama merkezlerinden alınan daha düşük kaliteli ürünlerin (genellikle 4 hasar durumundaki ürünler) demontaj işleminde değerlendirildiği ya da anlaşma yapılan toplama merkezlerinden tüm ürünlerin alınması zorunluluğu nedeni ile işlem yapılmadan stok maliyetine katlanıldığı görülmektedir. Aynı zamanda literatürde dikkate alınmayan ağırlık parametresinin bulanık olarak ele alınması neticesinde eşitlik olması gereken kısıtlardaki tamsayı olan karar değerkenlerinin aralıkta değer almaya başlaması sonrasında problem çözümü daha da zorlaşmıştır. Tüm bu sonuçlar çerçevesinde, koordinasyon merkezinin, genel yapıyı ve model sonuçlarını bilmesi sayesinde ağdaki sürecin daha etkin bir şekilde yönetilmesinde farklı stratejiler geliştirebilmesi için bilgi akışı sağlanmıştır. Ancak model sınırlılıkları gereği belli kısıt ve varsayımlar altında hipotetik bir problem üzerinden test edilmiştir. Dolayısı ile gelecek çalışmalarda gerçek veriler kullanılarak model test edilebileceği gibi NP açıdan zor olan bu problem çözümünde farklı meta-sezgisel yöntemler de denenebilir.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektronik atık gibi geri kazanılabilir ürünlerin yönetimi ve geri kazanımında çevre bilinci ile hareket eden organizasyon veya kitlelerin davranış ve uygulamaları önemli bir rol oynamakla birlikte sürecin yönetmeliklerle desteklenmesi ve devletçe denetlenmesi gerekmektedir. Bu süreçte yayınlanan AEEE Kontrol Yönetmeliğine göre belirlenen yükümlülüklerin yerine getirilmesinde kilit rol üreticilere verilmiştir. Üreticiler ya tüm sorumluluğu üstelenerek tersine veya kapalı döngü tedarik zinciri ağlarını kurup yönetmeyi ya da zorunlulukları yerine getirmek adına üçüncü parti firmalarla işbirliği yapmayı seçebilmektedirler. Tez kapsamında hazırlanan üretici veya organizasyon sorumluluğu ile toplama ve geri kazanım hedeflerini dikkate alan üç modelde de karar verici, karar verme ortamını modelin varsayımlarına dayanarak belirlediği takdirde her iki durumda da fayda sağlayacak niteliktedir. Karar verici, tersine/kapalı döngü tedarik zinciri ağında herhangi bir büyüklükteki tek bir üretici veya üretici grubu ve/veya üçüncü parti firmalar tarafından oluşturulan bir yönetim organı olabileceği gibi üretici/üretici grubu/üçüncü parti firmaların birleşerek kurdukları koordinasyon merkez/merkezleri olabilir. Sonuç olarak karar vericiler operasyonel sorumluluklarını ve önerilen model tarafından oluşturulan optimum çözümleri bilmenin avantajına sahiptirler.

Mevcut literatürden farklı olarak önerilen tüm modellerde farklı hasar seviyelerindeki ürün dönüşleri ve satışlar üzerinden minimum toplama hedefi dikkate alınmıştır. Modellerin değerleri gerçek hayattaki problemlere benzer şekilde tasarlanan problem setleri üzerinden çözümler ile gösterilmiştir. Aynı zamanda minimum toplama miktarlarının, üretici ve mağaza sayılarının, çevresel katsayıların ve farklı üyelik değerlerinin (risk değerleri) çözüme etkileri için senaryo analizleri yapılmıştır. Senaryo analizlerinin bulgularından çeşitli yönetimsel öngörüler elde edilerek fayda sağlanabilir. Sonuçlar, taşıma maliyetlerinin tersine tedarik zinciri ve kapalı döngü tedarik zinciri ağında karar vericiler için ciddi bir maliyet kalemi olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca Model 2'nin bir sonucu olarak AEEE Kontrol Yönetmeliğine göre yaşam ömrü dolan elektronik atıkların yakın gelecekte artan bir oranda toplamaları gerektiğinden tersine tedarik zinciri yönetimi ile ilgili maliyetlerin artacağı kanıtlanmaktadır. Bu maliyet sorunlarıyla başa çıkabilmek adına üreticilerin,

nakliye ve geri dönüşüm/yenileme süreçlerini yönetmek için ileri ve tersine tedarik zinciri ağlarını yeniden tasarlayarak işbirliğine dayalı organizasyon yapıları olarak koordinasyon merkezlerini kurmaları gibi daha etkin ve etkili yaklaşımlar bulmaları gerekmektedir.

Teknolojik pazarın hızlı bir şekilde büyümeye devam etmesiyle artan teknoloji üreticisi ve satıcısı tarafından neredeyse her gün yeni tip ve sayıda yenilikçi elektrikli ve elektronik ürünler piyasaya sürülmektedir. Model 2'deki çalışmada ağdaki çeşitli sayıda üretici ve mağazaya odaklanan senaryoların sonuçlarına göre, mağaza sayısı aynı kalırken artan üretici sayısının sonucunda daha yüksek kar ve tersine tedarik zinciri faaliyetleri ile ilişkili maliyet artışlarının elde edildiği görülmektedir. Bu bulgu üreticilerin e-atıklardan geri kazanılmış parça veya kullanılabilir yararlı malzeme taleplerindeki artış ile bağlantılı olabilmektedir. Diğer yandan üretici sayısı aynı kaldığında artan mağaza sayısı ile daha yüksek toplam kar sağlanırken, üretici kapasitelerinin artan talepleri karşımada yetersiz kaldığı ve talebi karşılamak için kapasite artırımına gidilmesi gerekmektedir. Model 1 ve Model 2'deki sonuçlara göre belirsizlik ortamında daha gerçekçi çözümler üretirken toplam kazanç değerlerinin de düştüğü görülmektedir. Ayrıca gerçek hayatta ele alınan bu problemdeki belirsizlikler nedeni ile çözümünün ne kadar zor olduğu bir kez daha kanıtlanmıştır.

Sonuç olarak, önerilen modeller ile yönetmelikte belirlenen genişletilmiş üretici sorumluluğuna tabi organizasyonlara karar verici olarak çevreci bir bakış açısı ile yönettikleri tersine ve kapalı döngü tedarik zinciri ağlarını optimize etmede ve etkin kararlar almalarında fayda sağlanmaya çalışılmıştır. Aynı zamanda koordinasyon merkezinin asli görevinin ne olması gerektiği ve merkezin sürece hangi görev ile nasıl dahil olabileceği ve sisteme kazandıracığı faydalar örnek uygulamalar üzerinden anlatılmaya çalışılmıştır. Benzer şekilde istatistiki verilerin yetersizliği ve toplanan ürünün ağırlığı, fiyatlandırma gibi bazı verilerin gerçek hayattaki belirsizliği neticesinde modeli gerçek hayata benzetebilmek adına hangi verilerin bulanıklaştırılabileceği ya da hangi verilere yoğunlaşarak istatistiki veri toplanması gerektiği ile ilgili konular da açıklanmaya çalışılmıştır. Ancak modellerin belli sınırları da mevcuttur ve modeller çalışmanın sınırlarını tanımlayan bazı varsayımlar altında tasarlanmıştır. Dolayısı ile gelecek çalışmalarda uygulama alanında iyileştirmeler



gerçekleştirilebilir. Gelecek çalışmalar için araştırmacılara aşağıdaki önerilerde bulunulabilir.

- Önerilen tüm modeller, problemin doğası gereği verilerin elde edilememesi gibi nedenlerle hipotetik örnek problemler üzerinden test edilmiştir. Dolayısı ile ilerleyen zamanlarda gerçek veriler kullanılarak gerçek örnekler üzerinden modeller ile çözüm sağlanabilir.
- Çalışmada ele alınan modelde çevresel etkiler basit katsayılar ile değerlendirilmiştir. Dolayısı ile karar verici olarak geri dönüşüm ve yenileme faaliyetlerinde çevresel etkilerin belirlenmesinde yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yöntemi kullanılabilir. Bununla birlikte birçok farklı ürün türü sistemde var ise LCA analizi çok fazla zaman alabilir. Bu nedenle karar vericinin çevresel etkileri hesaplamada iyi bir değerlendirme yaparak basit katsayıları ya da LCA yöntemini kullanma arasında karar vermesi gerekmektedir.
- E-atıklardaki toplama miktarları belirlenirken yeni ekipmanların değişken yaşam ömürleri dikkate alınabilir.
- Çalışmada modeller paket program kullanılarak çözülmüştür. Ancak ilerleyen çalışmalarda birçok NP-zor problemde başarı ile uygulanmış meta-sezgisel yöntemler önerilen modellere uygulanabilir.

## 8. KAYNAKLAR

Achillas, C., Vlachokostas, C., Aidonis, D., Moussiopoulos, N., Iakovou, E., Baniyas, G., "Optimising reverse logistics network to support policy-making in the case of electrical and electronic equipment", *Waste Management*, 30 (12), 2592-2600, (2010).

AEEEEKY. (2012). *Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği (in Turkish)*. Ankara.

Ahmadi, S., Amin, S. H., "An integrated chance-constrained stochastic model for a mobile phone closed-loop supply chain network with supplier selection", *Journal of Cleaner Production*, 226, 988-1003, (2019).

Akçalı, E., Çetinkaya, S., Üster, H., "Network design for reverse and closed-loop supply chains: An annotated bibliography of models and solution approaches", *Networks*, 53 (3), 231-248, (2009).

Alumur, S. A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Verter, V., "Multi-period reverse logistics network design", *European Journal of Operational Research*, 220 (1), 67-78, (2012).

Andrade, D. F., Romanelli, J. P., Pereira-Filho, E. R., "Past and emerging topics related to electronic waste management: top countries, trends, and perspectives", *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (17), 17135-17151, (2019).

Ayvaz, B., Bolat, B., Aydın, N., "Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment", *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 391-404, (2015).

Balde, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P., *The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows and resources*, United Nations University, International Telecommunication Union, (2017).

Benitez, E. O.-., Rios-Mercado, R. Z., Gonzalez-Velarde, J. L., "A metaheuristic algorithm to solve the selection of transportation channels in supply chain design", *International Journal Production Economics*, 145, 161-172, (2013).

Button, K., "20 Staggering E-Waste Facts", <http://earth911.com/eco-tech/20-e-waste-facts/>, Alındığı tarih: 18.01.2016.

Chatterjee, A., Abraham, J., "Efficient management of e-wastes", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14 (1), 211-222, (2017).

Che, Z., Chiang, T.-A., Kuo, Y., Cui, Z., "Hybrid algorithms for fuzzy reverse supply chain network design", *The Scientific World Journal*, 2014 (2014).

Chen, Y., Chan, F. T., Chung, S., Park, W.-Y., "Optimization of product refurbishment in closed-loop supply chain using multi-period model integrated with fuzzy controller under uncertainties", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 50, 1-12, (2018).

Coskun, S., Ozgur, L., Polat, O., Gungor, A., "A model proposal for green supply chain network design based on consumer segmentation", *Journal of Cleaner Production*, 110, 149-157, (2016).

Cui, J., Zhang, L., "Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review", *Journal of Hazardous Materials*, 158 (2-3), 228-256, (2008).

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2015). *Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik*.

Dai, Z., Li, Z., "Design of a dynamic closed-loop supply chain network using fuzzy bi-objective linear programming approach", *Journal of Industrial and Production Engineering*, 34 (5), 1-14, (2017).

Das, K., Chowdhury, A. H., "Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning", *International Journal of Production Economics*, 135 (1), 209-221, (2012).

Dat, L. Q., Linh, D. T. T., Chou, S.-Y., Vincent, F. Y., "Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products", *Expert Systems with Applications*, 39 (7), 6380-6387, (2012).

De Souza Melaré, A. V., González, S. M., Faceli, K., Casadei, V., "Technologies and decision support systems to aid solid-waste management: a systematic review", *Waste Management*, 59, 567-584, (2017).

Diallo, C., Venkatadri, U., Khatab, A., Bhakthavatchalam, S., "State of the art review of quality, reliability and maintenance issues in closed-loop supply chains with remanufacturing", *International Journal of Production Research*, 55 (5), 1277-1296, (2017).

Doan, L. T. T., Amer, Y., Lee, S.-H., Phuc, P. N. K., Dat, L. Q., "E-Waste Reverse Supply Chain: A Review and Future Perspectives", *Applied Sciences*, 9 (23), 5195, (2019a).

Doan, L. T. T., Amer, Y., Lee, S.-H., Phuc, P. N. K., Dat, L. Q., "A Comprehensive Reverse Supply Chain Model using an Interactive Fuzzy Approach-a Case Study on the Vietnamese Electronics Industry", *Applied Mathematical Modelling*, (2019b).

Dowlatsahi, S., "Developing a theory of reverse logistics", *Interfaces*, 30 (3), 143-155, (2000).

EC. (2007). The Producer Responsibility Principle of the WEEE Directive, European Commission.

ELDAY, "Konak Belediyesi E-atık Toplama Noktaları, Elektrik ve Elektronik Geri Dönüşüm ve Atık Yönetimi Derneği İktisadi İşletmesi", <https://elday.org/duyuru/konak-belediyesi-ile-anlasildi>, Alındığı tarih: 18.01.2016.

EPA, "Why Recycle Electronic Products", <https://www.epa.gov/recycle/electronics-donation-and-recycling>, Alındığı tarih: 18.01.2017.

EU, "Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast)", *Official Journal of the European Union*, L 197, 38-71, (2012).

Gamberini, R., Gebennini, E., Rimini, B., "An innovative container for WEEE collection and transport: details and effects following the adoption", *Waste Management*, 29 (11), 2846-2858, (2009).

Gomes, M. I., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q., "Modelling a recovery network for WEEE: A case study in Portugal", *Waste Management*, 31 (7), 1645-1660, (2011).

Goodship, V., Stevels, A., *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook*, Elsevier, (2012).

Govindan, K., Soleimani, H., "A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus", *Journal of Cleaner Production*, 142, 371-384, (2017).

Govindan, K., Soleimani, H., Kannan, D., "Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future", *European Journal of Operational Research*, 240 (3), 603-626, (2015).

Grünbergen, J., Mark-Berglung, T., "Statistic on Waste Electrical and Electronic Equipment", *Kopenhag, Ekspresen Tryk-Kopicenter*, (2003).

Gungor, A., Gupta, S. M., "Disassembly sequence plan generation using a branch-and-bound algorithm", *International Journal of Production Research*, 39 (3), 481-509., (2001).

Güleş, H. K., Paksoy, T., Bülbül, H., Özceylan, E., *Tedarik zinciri yönetimi: stratejik planlama, modelleme ve optimizasyon*, Gazi Kitabevi, (2012).

Hasanov, P., Jaber, M., Tahirov, N., "Four-level closed loop supply chain with remanufacturing", *Applied Mathematical Modelling*, 66, 141-155, (2019).

Huisman, J., Stevels, A., Baldé, K., Magalini, F., Kuehr, R., "The e-waste development cycle, part III—policy & legislation, business & finance, and technologies & skills", *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook*, Elsevier, 93-141, (2019).

Huscroft, J. R., Hazen, B. T., Hall, D., Skipper, J. B., Hanna, J. B., "Reverse logistics: past research, current management issues, and future directions", *International Journal of Logistics Management*, 24 (3), 304-327, (2013).

İmre, Ş., Beldek, T., Yıldırım, N., Bolat, H. B., "Türkiye'de AEEE Yönetmelik Uygulamalarına ilişkin Durum Analizi", *Uluslararası Katılımlı 16. Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, İstanbul, 638-644, (2016 of Conference).

Isernia, R., Passaro, R., Quinto, I., Thomas, A., "The Reverse Supply Chain of the E-Waste Management Processes in a Circular Economy Framework: Evidence from Italy", *Sustainability*, 11 (8), 2430, (2019).

Islam, M. T., Huda, N., "Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review", *Resources, Conservation and Recycling*, 137, 48-75, (2018).

Jafari, H., Hejazi, S. R., Rasti-Barzoki, M., "Sustainable development by waste recycling under a three-echelon supply chain: A game-theoretic approach", *Journal of Cleaner Production*, 142, 2252-2261, (2017).

Jayant, A., Gupta, P., Garg, S., "Perspectives in reverse supply chain management (R-SCM): A state of the art literature review", *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 6 (1), 87-102, (2012).

Jiménez, M., "Ranking fuzzy numbers through the comparison of its expected intervals", *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 04 (04), 379-388, (1996).

Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., Rodríguez, M. V., "Linear programming with fuzzy parameters: An interactive method resolution", *European Journal of Operational Research*, 177 (3), 1599-1609, (2007).

John, S. T., Sridharan, R., Kumar, P. R., "Reverse logistics network design: a case of mobile phones and digital cameras", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94 (1-4), 615-631, (2018).

John, S. T., Sridharan, R., Kumar, P. R., Krishnamoorthy, M., "Multi-period reverse logistics network design for used refrigerators", *Applied Mathematical Modelling*, 54, 311-331, (2018).

Kazemi, N., Modak, N. M., Govindan, K., "A review of reverse logistics and closed loop supply chain management studies published in IJPR: a bibliometric and content analysis", *International Journal of Production Research*, 1-24, (2018).

Kiddee, P., Naidu, R., Wong, M. H., "Electronic waste management approaches: An overview", *Waste Management*, 33 (5), 1237-1250, (2013).

Kilic, H. S., Cebeci, U., Ayhan, M. B., "Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (WEEE) in Turkey", *Resources, Conservation and Recycling*, 95, 120-132, (2015).

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

Kunz, N., Mayers, K., Van Wassenhove, L. N., "Stakeholder views on extended producer responsibility and the circular economy", *California Management Review*, 60 (3), 45-70, (2018).

Li, J., Liu, L., Zhao, N., Yu, K., Zheng, L., "Regional or global WEEE recycling. Where to go?", *Waste management*, 33 (4), 923-934, (2013).

Liao, T.-Y., "Reverse Logistics Network Design for Product Recovery and Remanufacturing", *Applied Mathematical Modelling*, 60, 145-163, (2018).

Ma, H., Li, X., "Closed-loop supply chain network design for hazardous products with uncertain demands and returns", *Applied Soft Computing*, 68, 889-899, (2018).

Messmann, L., Helbig, C., Thorenz, A., Tuma, A., "Economic and environmental benefits of recovery networks for WEEE in Europe", *Journal of Cleaner Production*, 222, 655-668, (2019).

Neto, J. Q. F., Walther, G., Bloemhof, J., Van Nunen, J., Spengler, T., "A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks", *European Journal of Operational Research*, 193 (3), 670-682, (2009).

Nowakowski, P., "A proposal to improve e-waste collection efficiency in urban mining: Container loading and vehicle routing problems—A case study of Poland", *Waste Management*, 60, 494-504, (2017).

NTCRS. (2014). National television and computer recycling scheme outcomes in 2012-2013.

Özceylan, E., Demirel, N., Çetinkaya, C., Demirel, E., "A closed-loop supply chain network design for automotive industry in Turkey", *Computers & Industrial Engineering*, 113, 727-745, (2017).

Parra, M. A., Bilbao, A. B., Pérez, B. G., Rodríguez, M. V. U., "Solving a multiobjective possibilistic problem through compromise programming", *European Journal of Operational Research*, 164 (3), 748-759, (2005).

Pérez-Belis, V., Bovea, M., Ibáñez-Forés, V., "An in-depth literature review of the waste electrical and electronic equipment context: Trends and evolution", *Waste Management & Research*, 33 (1), 3-29, (2015).

Pishvaei, M. S., Torabi, S. A., "A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Fuzzy Sets and Systems*, 161 (20), 2668-2683, (2010).

Polat, O., Capraz, O., Gungor, A., "Modelling of WEEE recycling operation planning under uncertainty", *Journal of Cleaner Production*, 180, 769-779, (2018).

REC-Türkiye. (2016). *Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi*. (978-975-6180-45-7).

REC. (2011). Atık elektrikli ve elektronik eşyalar direktif (AEEE) (2002/96/EC) düzenleyici etki analizi.

REC. (2016). Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi. In Sayman, R. Ü. (Ed.). Bölgesel Çevre Merkezi (REC) Türkiye.

Robinson, B. H., "E-waste: An assessment of global production and environmental impacts", *Science of The Total Environment*, 408 (2), 183-191, (2009).

Rogers, D. S., Tibben-Lembke, R., "An examination of reverse logistics practices", *Journal of business logistics*, 22 (2), 129-148, (2001).

Samuel, C. N., Venkatadri, U., Diallo, C., Khatab, A., "Robust closed-loop supply chain design with presorting, return quality and carbon emission considerations", *Journal of Cleaner Production*, 247, 119086, (2020).

Savage, M., Ogilvie, S. (2006). Implementation of Waste Electric and Electronic Equipment Directive in EU 25.

Scopus, <https://www.scopus.com>, Alındığı tarih: 09.11.2020.

Seuring, S., Müller, M., "From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management", *Journal of Cleaner Production*, 16 (15), 1699-1710, (2008).

Shaharudin, M. R., Govindan, K., Zailani, S., Tan, K. C., Iranmanesh, M., "Product return management: Linking product returns, closed-loop supply chain activities and the effectiveness of the reverse supply chains", *Journal of Cleaner Production*, 149, 1144-1156, (2017).

Shokouhyar, S., Aalirezai, A., "Designing a sustainable recovery network for waste from electrical and electronic equipment using a genetic algorithm", *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 16 (1), 60-79, (2017).



Srivastava, S. K., "Network design for reverse logistics", *Omega*, 36 (4), 535-548, (2008).

Tansel, B., "From electronic consumer products to e-wastes: Global outlook, waste quantities, recycling challenges", *Environment International*, 98, 35-45, (2017).

Terazono, A., Murakami, S., Abe, N., Inanc, B., Moriguchi, Y., Sakai, S.-i., ve diğ., "Current status and research on E-waste issues in Asia", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 8 (1), 1-12, (2006).

Turner, M., Callaghan, D., "UK to finally implement the WEEE directive", *Computer Law & Security Review*, 23 (1), 73-76, (2007).

Van Engeland, J., Beliën, J., De Boeck, L., De Jaeger, S., "Literature review: strategic network optimization models in waste reverse supply chains", *Omega*, 91, 102012, (2020).

Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., Böni, H., "Global perspectives on e-waste", *Environmental Impact Assessment Review*, 25 (5), 436-458, (2005).

Xu, Z., Elomri, A., Pokharel, S., Zhang, Q., Ming, X., Liu, W., "Global reverse supply chain design for solid waste recycling under uncertainties and carbon emission constraint", *Waste Management*, 64, 358-370, (2017).

Yoo, S. H., Kim, B. C., "Joint pricing of new and refurbished items: A comparison of closed-loop supply chain models", *International Journal of Production Economics*, 182, 132-143, (2016).

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : LEYLA ÖZGÜR POLAT

Doğum Yeri ve Tarihi : Kırcaali/ BULGARİSTAN 01.07.1986

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Y. Lisans Üniversite (varsa) : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : lozgur@pau.edu.tr

İletişim Adresi : Pamukkale Üniversitesi Rektörlüğü  
Bilgi İşlem Daire Başkanlığı  
Kınıklı Kampüsü / Pamukkale / Denizli

### **Yayın Listesi** :

Özgür Polat Leyla, Güngör Aşkner (2020). WEEE closed-loop supply chain network management considering the damage levels of returned products. Environmental Science and Pollution Research. Doi: 10.1007/s11356-020-10249-6 (Yayın No: 6552354)

Özgür Polat Leyla, Polat Olcay, Güngör Aşkner (2019). “Designing Fuzzy Reverse Supply Chain Network for E-Waste” Economy Business (13), 367-375.

Ozgur Polat Leyla, Güngör Aşkner (2019) “Network Design Problem in E-Waste Management” Electronic Waste Management and Treatment Technology, M.N.V. Prasad, 77-102

Polat Olcay, Ünal Ömer Faruk, Özgür Polat Leyla, Güngör Aşkner (2019) “Integrated Forward-Reverse Logistics Network Design: An Application on the Electrolytic Copper Conductor Reel Distribution”, Responsible Manufacturing: Issues Pertaining to Sustainability, CRC Press, Boca Raton, FL, ISBN 978-081-537-507-4, 85-103.

Coşkun Semih, Polat Olcay, Özgür Polat Leyla (2018). “Tedarikçilerin Etkinliklerinin İyileştirilmesine Yönelik Analitik Hiyerarşi Süreci ve Veri Zarflama Analizi Yöntemlerine Dayanan Model Önerisi ve Bir Vaka Çalışması” Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 5(3), 483-497. Doi: 10.30798/makuiibf.415919

Özgür Polat Leyla, Güngör Aşkıner, Özbent Başar (2016). “Supply Chain Network Design Using Constraint Programming” International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering, 4(9), 141-145.

Yaldır Abdulkadir, Özgür Polat Leyla (2016). “Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Elektronik Belge Yönetim Sistemi Seçimi-Electronic Document Management System Selection With Multi Criteria Decision Making Techniques.” Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 8(14), 88-108. Doi: 10.20875/sb.56729

Coşkun Semih, Özgür Polat Leyla, Polat Olcay, Güngör Aşkıner (2016). “A Model Proposal for Green Supply Chain Network Design Based on Consumer Segmentation” Journal of Cleaner Production, 110, 149-157. Doi: 10.1016/j.jclepro.2015.02.063

#### **Konferans listesi :**

Özgür Polat Leyla, Güngör Aşkıner (2019). “İş Modelleme ve Performans Ölçütleri ile Bakım Yönetim Sistem Tasarımı” IXth International Maintenance Technologies Congress and Exhibition.

Özgür Polat Leyla, Polat Olcay, Güngör Aşkıner (2019). “Designing Fuzzy Reverse Supply Chain Network For E-Waste” 18th International Conference on Economy and Business.

Özgür Polat Leyla, Özsüt Boğar Zeynep, Çapraz Ozan, Güngör Aşkıner (2018). Comparing WEEE Management Approaches between Turkey and EU Countries. II. International Scientific and Vocational Studies Congress – Engineering and Natural Sciences .

Özgür Polat Leyla, Güngör Aşkner (2018). “E-Waste Reverse Supply Chain Network Design Considering Environmental Impacts” The Third International Conference on Computational Mathematics and Engineering Sciences (CMES-2018) (Özet Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:4655828).

Özsüt Boğar Zeynep, Çapraz Ozan, Özgür Polat Leyla, Güngör Aşkner (2018). An Overview of E-Waste Estimation Methods And Their Applicability for the Case of Turkey. 4th International Researchers, Statisticians And Young Statisticians Congress.

Özgür Polat Leyla, Güngör Aşkner (2017). “A Closed-Loop Supply Chain Network Design for WEEE Including Refurbishing Decisions” The 15th International Logistics and Supply Chain Congress (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:3626191).

Polat Olcay, Ünal Ömer Faruk, Özgür Polat Leyla, Güngör Aşkner (2017). “An Integrated Forward-Reverse Logistics Network Design for Electrolytic Copper Conductor Reel Distribution” The 15th International Logistics and Supply Chain Congress (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:3626239).

Polat Olcay, Aydın Seçkin, Özgür Polat Leyla, Kalaycı Can Berk (2017). “A Parallel Variable Neighborhood Search Based Solution Approach to Design the Service Network for a Beverage Distribution Company” The 15th International Logistics and Supply Chain Congress (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:3738489).

Özgür Polat Leyla, Polat Olcay, Kalaycı Can Berk, Aydın Seçkin (2017). “A Variable Neighborhood Search Based Solution Approach for Designing Service Network of Beverage Distribution” Optimization 2017, 84-85. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:3743296).

Polat Olcay, Kalaycı Can Berk, Özgür Polat Leyla, Mutlu Özcan (2017). Variable Neighborhood Search for the Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem. International Conference On Engineering Technology And Innovation (Özet Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:3821312).

Kalaycı Can Berk, Ertenlice Ökkes, Özgür Polat Leyla, Güngör Aşkner (2017). Ant Colony Optimization for Portfolio Optimization. International Conference On Engineering Technology and Innovation.

Polat Olcay, Kalaycı Can Berk, Özgür Polat Leyla, Mutlu Özcan (2017). Variable Neighborhood Search for the Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem. The International Conference on Engineering Technology and Innovation (Özet Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:3475249).

Çapraz Ozan, Özgür Polat Leyla, Özsüt Boğar Zeynep, Güngör Aşkner (2017). Review of Estimation Methods for E-Waste Quantities and the Application of Simple Delay Method for the Case of Turkey. The International Conference on Engineering Technology and Innovation, 119 (Özet Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:3463058).

Özsüt Boğar Zeynep, Özgür Polat Leyla, Çapraz Ozan, Güngör Aşkner (2017). Determining the Location of a Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Recycling Plant in the Aegean Region of Turkey. The International Conference on Engineering Technology and Innovation, 118 (Özet Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:3463176).

Özgür Polat Leyla, Güngör Aşkner, Özbent Başar (2016). Supply Chain Network Design Using Constraint Programming. 76th The IIER International Conference (76), 51-55. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:2852822).

Yaldır Abdulkadir, Özgür Polat Leyla, Taner Mustafa Egemen, Yanmaz Arpacı Öncü, Yıldırım Tevfik, Koyuncuoğlu Mehmet Ulaş (2015). Üniversiteler İçin Kurumsal Veri Değerlendirme Sistemleri ve Kazanımları Üzerine Örnek Bir Uygulama. ICQH 2015 International Conference on Quality in Higher Education (Tam Metin Bildiri/) (Yayın No:2047598).

Yaldır Abdulkadir, Koyuncuoğlu Mehmet Ulaş, Yanmaz Arpacı Öncü, Taner Mustafa Egemen, Yıldırım Tevfik, Özgür Polat Leyla (2015). Yükseköğretim Kurumları İçin Süreç Yönetim Bilgi Sistemi Pamukkale Üniversitesi Örneği. ICQH 2015 International Conference on Quality in Higher Education (Tam Metin Bildiri/) (Yayın No:2047946).

Özgür Polat Leyla, Coşkun Semih, Güngör Aşkner (2015). Green Supply Chain Network Design Considering Fuzzy Retailer Expectations. 2015 Northeast Decision Sciences Conference (Özet Bildiri/) (Yayın No:2046487).

Özgür Polat Leyla, Coşkun Semih, Güngör Aşkner (2015). Türkiyedeki Endüstri Mühendisliği Lisans Eğitiminde Çevre Duyarlılığı. X. Endüstri-İşletme Mühendisliği Kurultayı (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:2889475).

Özgür Polat Leyla, Coşkun Semih, Polat Olcay, Güngör Aşkner (2014). Green Supply Chain Network Design Considering Expectations of Customers and Retailer. 2nd Annual International Conference on Industrial, Systems and Design Engineering (2) (Özet Bildiri/)(Yayın No:2046055).

Coşkun Semih, Karatepe Tuğçe, Özgür Polat Leyla (2014). Kobilerde Bütünsel Süreç Geliştirme Yaklaşımının İncelenmesi ve Geliştirme Maliyetlerinin Optimizasyonuna Yönelik Bir Model Önerisi. 15th International Symposium on Econometrics, Operations Research and Statistics, 137 (Özet Bildiri/) (Yayın No:2044958).

Baysal Işıl, Mutlu Özcan, Özgür Polat Leyla, Polat Olcay (2014). Yalın Araçlarla Bir Hastanenin Randevu Sisteminin Yeniden Düzenlenmesi. 15th International Symposium on Econometrics, Operations Research and Statistics(15), 284 (Özet Bildiri/)(Yayın No:2045269).

Coşkun Semih, Kaya Nagehan, Güngör Aşkner, Özgür Polat Leyla (2014). Bulanık Ortamda Satış Gelirlerinin Belirlenmesine Yönelik Çoklu Regresyon Tahmin Model Önerisi ve Bir Tekstil İşletmesine Uygulanması. 15th International Symposium on Econometrics, Operations Research and Statistics, 394-405. (Tam Metin Bildiri/) (Yayın No:2044168).

Özgür Polat Leyla, Yaldır Abdulkadir, Tola Abdullah Tahsin (2014). Elektronik Belge Yönetim Sisteminin Bulanık Ahp Yöntemi ile Seçimine Yönelik Bir Uygulama. 2.Ulusal Yönetim Bilişim Sistemleri Kongresi Programı (2), 781-789. (Tam Metin Bildiri/) (Yayın No:2434727).

Coşkun Semih, Özgür Polat Leyla, Polat Olcay, Güngör Aşkner (2013). A Multi Objective Goal Programming for Green Supplier Transportation Network Design Based on Customer Segmentation. 3th International Conference on Logistics and Maritime Systems (Yayın No:1039562).

Özgür Polat Leyla, Coşkun Semih, Güngör Aşkner, Polat Olcay (2012). Green Supplier Network Design Based on Customer Segmentation. 25th European Conference on Operational Research (Yayın No:1039563).

Özgür Polat Leyla, Sarioğlu Durcan Özgün, Güngör Aşkner (2011). Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Otobüs Terminal Konumunun Belirlenmesi Denizli Örneği. 12th International Symposium on Econometrics Operations (Tam Metin Bildiri/) (Yayın No:1039570).

Coşkun Semih, Güngör Aşkner, Özgür Polat Leyla (2011). Global Perakende Zincirlerinin Ev Tekstili Ürünleri Tedarikçilerini Seçme ve Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi ve Tedarikçilerin Seçilme Performanslarını Artırmaya Yönelik Fayda Maliyet Optimizasyonu Modeli. 31.Ulusal Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği, 95-106. (Yayın No:1039568).