

## ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYALAR İÇİN ÇOK AMAÇLI BİR TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIMI: İSTANBUL UYGULAMASI

Özlem KARADENİZ ALVER<sup>\*,\*\*\*</sup>

Berk AYVAZ<sup>\*\*</sup>

Bülent ÇATAY<sup>\*\*\*</sup>

Alınma:27.08.2018; düzeltme: 25.11.2018; kabul:30.11.2018

**Öz:** Bu çalışmada, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği'ne göre İstanbul ilinde toplanması gereken AEEE için çok amaçlı karma tamsayı programlama modeli oluşturulmuştur. Model, sürdürülebilirlik kavramının üç temel hedefinden (ekonomik, çevresel ve sosyal) yola çıkarak, sorumlu paydaşların yönetmelikte tanımlanan yükümlülükleri dikkate alınarak tasarlanmıştır. Fakat yönetmeliğe rağmen yasa dışı olarak AEEE toplayan ve ayrıştıran hurdacılar mevcuttur. Bu tip atıklar insan sağlığına oldukça zararlı olduğundan, gerekli ekipmanları olmayan hurdacılar için risk oluşturmaktadır. Buradan yola çıkarak, AEEE toplayan hurdacıların ve hurda depolarının, devlet teşviki ile yasal atık sistemine dâhil edilerek sağlıklarının güvence altına alınması ve sosyal statülerinin artırılması sosyal amaç olarak seçilmiştir. Bu bağlamda, modelin sosyal faydayı hedefleyen amacı istihdamı enbüyüklemektir. Modelin diğer amaçları, tersine lojistik operasyonlarının çevreye yarattığı olumsuz etkileri enküçükmek ve AEEE işleme ve geri kazanım sisteminin toplam kârını enbüyüklemektir. Farklı atık toplama yüzdeleri ve devlet teşviki miktarları için senaryolar oluşturulmuştur. Önerilen model CPLEX eniyileme çözücüsü kullanılarak epsilon kısıt yöntemi ile çözülmüş ve açılacak atık işleme tesislerine ve teşvik verilerek AEEE geri kazanım sistemine dâhil edilecek hurda depolarına karar verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tersine Lojistik, Ağ Tasarımı, AEEE, Sürdürülebilirlik, Sosyal Fayda

### A Multi-Objective Reverse Logistics Network Design for Waste Electrical and Electronic Equipment: The Case of Istanbul

**Abstract:** In this study, we propose a multi-objective mixed-integer programming model for the collection of Waste of Electric and Electronic Equipment (WEEE) in Istanbul, by following the requirement set by the Ministry of Environment and Urbanization WEEE Directive. The model considers three aspects of sustainability, namely economic, environmental and social. Although the responsibilities of related authorities explicitly defined in the directive, illegal WEEE collectors still operate in the collection system. These illegal collectors do not utilize proper equipment and provide necessary conditions for the treatment of WEEE, which may cause significant health-related and life-threatening issues. By taking this situation into account, we adopt the official employment of illegal WEEE scrap dealers and inclusion of their junk yards into legal waste stream as the social objective of the model. In other words, maximizing the employment is one of the objectives. The remaining two objectives deal with minimizing the adverse environmental effect of reverse logistics activities and maximizing the overall profit of WEEE treatment and recovery network. The proposed model is solved using CPLEX solver by utilizing the epsilon-constraint method. We consider various scenarios with respect to WEEE

\* Maltepe Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34857, Maltepe İstanbul

\*\* İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Küçükyalı 34840, İstanbul

\*\*\* Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Tuzla 34956 İstanbul

İletişim Yazarı: Özlem KARADENİZ ALVER (okaradeniz@sabanciuniv.edu)

collection targets to make WEEE treatment facilities siting decisions and to determine the subsidy amounts for the scrap dealer junkyards which will be included in the recovery system and discuss the results.

**Keywords:** Reverse Logistics, Network Design, WEEE, Sustainability, Social Benefit

## 1. GİRİŞ

Hızla artmakta olan nüfusla beraber tüketim seviyesi yükselmektedir ve bunun sonucu olarak doğal da kaynakların sürdürülebilirliği konusu endüstrileşmiş toplumlar için hayati önem taşımaya başlamıştır. Bir taraftan dünya üzerindeki doğal kaynaklar azalırken insanoğlunun ürettiği atık miktarı da artmaktadır (Kılıç ve diğ., 2015). Açığa çıkan tehlikeli atık kategorilerinden biri de çoğalan nüfus ve teknolojik gelişmelere paralel olarak artış gösteren atık elektrikli ve elektronik eşyalardır (AEEE). Bu atıklar hem geri kazanılabilir malzemeler barındırırken hem de uygun şekilde bertaraf edilmediğinde insan sağlığını ve yaşadığımız çevreyi tehdit edebilecek materyaller içermektedir (Achillas ve diğ., 2010). Belirtilen sebeplerden ötürü birçok ülkede AEEE yönetimi için çevre mevzuatları uygulanmaya başlanmıştır. Uygulamaya konulan yönetmeliklerde, üreticiler, lojistik hizmeti sağlayıcılar ve belediyeler gibi AEEE'nin ilgili olduğu paydaşların sorumluluk alanları tüm elektrikli ve elektronik atık türleri gözetilerek belirtilmiştir. Bu yönetmeliklerden en önemlilerinden ikisi Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Belirli Tehlikeli Maddelerin Sınıflandırılmasına İlişkin Yönetmeliği (2002/95/AT) ve Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalara İlişkin Yönetmeliğidir (Temur, Bolat, 2017). Bahsi geçen yönetmeliklerin temel hedefi, açığa çıkan AEEE miktarını azaltmak, geri kazanım uygulamalarını ve tüm paydaşların çevresel performanslarını arttırmaktır (REC, 2012). Ülkemizde uygulanan güncel yönetmelik ise Mayıs 2012 tarihinde yayımlanan "Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği'dir. Bu yönetmelikte dünyadaki diğer örneklerine benzer şekilde ilgili paydaşların yükümlülükleri belirtilmiştir. Fakat yasa dışı olarak AEEE toplayan ve işleyen hurdacılar da mevcuttur (Şekil 1). Söz konusu işlemler olması gereken standartların çok altında kaldığından başta hurdacılar olmak üzere insan sağlığı ve çevre için ciddi bir tehdit unsuru olmaktadır. Ayrıca elektrikli ve elektronik eşyaların içerisindeki ekonomik değeri yüksek bileşenler geri dönüştürülemediğinden sistemin ekonomik performansı da düşmektedir. Dolayısıyla kayıt dışı olan bu hurdacıların yapılacak yatırımlar ile standartlarının artırılması ve yasal hale getirilmesi oldukça önemlidir (REC, 2016). Bu çalışmada devlet desteği ile kayıt dışı çalışan hurdacıların fiziki imkânlarını artırılıp ön sınıflandırma tesisi olarak atık geri kazanım ve bertaraf sistemine dâhil edilmesi hedeflenmiştir.



a.



b.

### Şekil 1:

AEEE toplayan bir hurdacı ve hurda deposundan bir görüntü;  
a. Sokakta atık toplayan hurdacı b. Hurda deposu örneği

Çalışma literatürdeki diğer ağ tasarımı çalışmalarından farklı olarak yasal olmayan atık akışını ve tehdit altındaki hurdacıları göz ardı etmeyen bir ağ yapısı önermektedir. Bu bağlamda çok amaçlı karma tamsayı programlama modeli tasarlanmış ve problem İstanbul ili için epsilon kısıt yöntemi ile çözülmüştür. Böylelikle İstanbul için açılması gereken atık işleme tesislerine ve yatırım yapılabilecek hurda depolarına karar verilmiştir.

Çalışmanın bundan sonraki kısımları şu şekilde ilerlemektedir: İkinci bölümde literatür araştırmasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde model ve metodoloji incelenmiştir. Yine bu bölümde modelin İstanbul ili için uygulaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar dördüncü bölümde sunulmuştur. Son bölümde ise çalışmanın sonuçları tartışılarak, gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Tersine lojistik, ürünlerin ve materyallerin tekrar kullanılabilmesine ilişkin tüm operasyonları içeren geniş bir alandır. En genel ifadesiyle, tersine lojistiğin amacı tedarik zincirindeki tersine akışın etkin bir yönetimidir. Bu amaçla kaynak tasarrufu, geri dönüşüm, materyallerin yeniden kullanımı ve atıkla mücadeleye ilişkin lojistik operasyonları tersine lojistiğin kapsamındadır (Govindan, ve diğ., 2016). Tersine lojistik alanında yapılan araştırmalar 1970'lerden beri hızla artmaktadır. 1980'li yıllarla beraber bu alandaki araştırmaların çoğu tersine lojistik ağ tasarımı ve stratejileri üzerine yoğunlaşmıştır. Son yıllarda da tersine lojistik ağ tasarımı ve optimizasyonu odak noktası olma özelliğini korumaktadır (Ye, Zhenhua, 2014).

Tersine lojistik ağ tasarımı üzerine olan araştırmaların en önemli hedeflerinden birisi maliyet enküçüklemesi ya da kâr enbüyüklemesidir. Alshamsi ve Diabat (2017) farklı taşıma ve yatırım seçeneklerinin göz önüne alındığı karma tam sayılı lineer programlama modeli geliştirmiştir ve bu model Körfez Arap Ülkeleri Bölgesinde açığa çıkan ev aletleri için uygulanmıştır. Problem Genetik Algoritma ile çözülmüş, kârı enbüyükleyecek şekilde açılacak ya da kapasitesi arttırılacak muayene istasyonu ve yeniden üretim tesislerine karar verilmiştir. Kılıç ve diğ. (2015) Türkiye'de açığa çıkan AEEE için bir ağ tasarımı modeli oluşturmuştur. Farklı tip depolama alanları ve geri dönüşüm tesislerine bağlı olarak oluşturulan 10 farklı senaryo Avrupa Birliği Yönetmeliğinin belirtmiş olduğu minimum geri dönüşüm oranları dikkate alınarak çözümlenmiştir.

Tersine lojistik ağ tasarımı problemleri geleneksel tedarik zinciri problemlerine oranla daha fazla belirsizlik içermektedir (Lieckens, Vandaele, 2007). Ayvaz ve diğ. (2015) miktar, kalite ve taşıma maliyeti belirsizlikleri altında iki aşamalı stokastik programlama modeli önermişlerdir. Model Türkiye'de faaliyet gösteren atık elektrikli ve elektronik eşya geri dönüşümü yapan bir firma için örneklem ortalama yaklaşımı yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Salema ve diğ. (2007) talep ve geri dönen ürün miktarı belirsizliklerini dikkate alan kapasite kısıtlı genel bir ağ tasarımı modeli geliştirmişlerdir. Ortaya konan karma tamsayı formülasyon dal-sınır yöntemi ile çözümlenmiştir.

Ekonomik amaca ek olarak, ağ tasarımı problemleri, artan çevresel bilinç ve yürürlüğe giren yönetmeliklere bağlı olarak farklı hedefleri içerebilir. Bu durum araştırmacıların da çok amaçlı modeller geliştirmesinin önünü açmıştır (Pishvae ve diğ., 2010). Govindan ve diğ. (2016) sürdürülebilirliğin üç boyutunu (ekonomik, sosyal ve çevresel) hesaba katarak bulanık matematiksel programlama modeli kullanmış ve çok amaçlı parçacık sürü algoritması uygulanmıştır. Kannan ve diğ. (2012) karbon ayak izi odaklı tersine lojistik ağ tasarımı için karma tamsayı lineer programlama modeli oluşturmuştur. Modelin amaç fonksiyonu, toplama, bertaraf, ulaştırma ve tesis açma maliyetine ek olarak karbon emisyon maliyetini de hesaba katmaktadır. El Korchi ve Millet (2011) farklı tersine lojistik kanal yapılarını değerlendiren bir çalışma ortaya koymuşlardır. Kullanımda olan kanal yapıları analiz edilmiş ve hem ekonomik olarak daha verimli hem de çevreye etkisi daha az olan bir kanal önerisi sunulmuştur. Yu ve

Solvang (2017) düşük karbon emisyonunu hedefleyen tek periyotlu ve çok ürünlü stokastik bir optimizasyon modeli tasarlamıştır. Önerilen modelde devlet teşviki ile kullanımı bitmiş ürünlerin atık depolama alanlarından ayrıştırıp, geri kazanım uygulamalarının kalitesinin artırılması hedeflenmektedir. Model, çeşitli emisyon seviyeleri altında test edilmiştir ve sonuçlar emisyon değerleri azaldığında sistemin kârının azaldığını göstermektedir.

Govindan ve diğ. (2017) belirsizlikler altında geleneksel tedarik zinciri tasarımı ve tersine lojistik ağ tasarımı modellerini incelemiştir. Çalışma, tersine lojistik ağ tasarımı modellerinin çok az bir kısmının çok amaçlı olarak tasarlandığını ortaya koymaktadır. Çalışmamız ise ekonomik hedeflere ek olarak çevresel etki ve sosyal faydayı da hesaba katan çok amaçlı bir model niteliği taşımaktadır. Ayrıca yasal olmayan yollarla toplanan elektrikli ve elektronik atıklar ve hurdacı problemine dikkat çekmektedir. Çözüm olarak devlet teşviki ile hurdacıların ve hurda depolarının atık sistemine kazandırılması hedeflenmektedir.

### 3. ÖNERİLEN MODEL

Bu çalışmada, 4 farklı tip atık elektrikli ve elektronik eşya (Tablo 1) için çok periyotlu tersine lojistik ağ tasarım problemi ele alınmıştır ve İstanbul ili için uygulanmıştır. Problemin bileşenleri, Şekil 2’de gösterildiği gibi atık oluşma noktaları, atık toplama noktaları, atık işleme tesisleri, hurdacılar, atık bertaraf noktaları ve 2. el hammadde alıcılarıdır. Atıkların oluşma noktaları, ilçe merkezleri olarak kabul edilmiştir. Adalar ilçesinde toplanması gereken atık miktarı Tuzla ilçesine eklenmiştir. Bu sebeple 38 adet atık oluşma noktası vardır. Bu noktalarda oluşan atık miktarları, AEEE Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi’nde belirtilen toplama hedefleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Güncel yönetmelikte toplama hedefleri en son 2018 senesine kadar belirlenmiştir ve 2018 için kişi başı toplama hedefi 4 kg’dır. Bu çalışmada, tüm kararlar 2018-2023 seneleri için alınmaktadır ve kişi başı toplama hedeflerinin her sene 0,5 kg arttığı varsayılmıştır. Ayrıca popülasyon artış hızı İstanbul ili için 0,01 olarak varsayılmıştır.

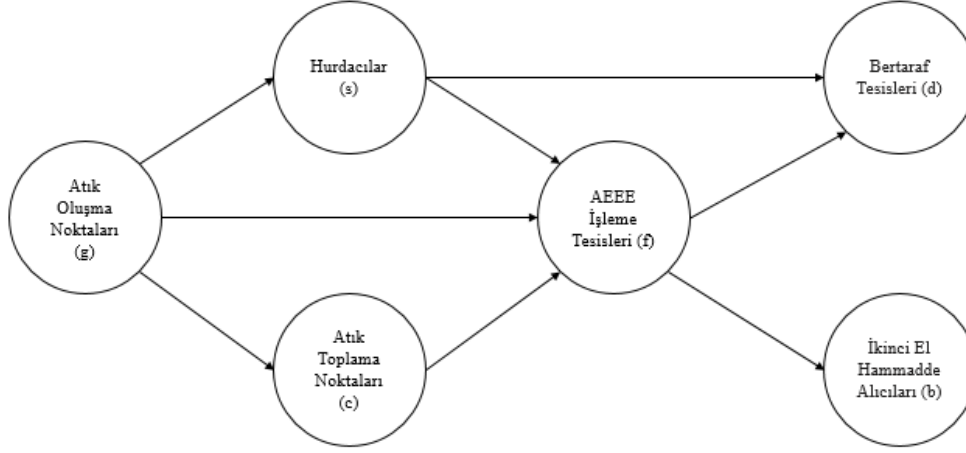
**Tablo 1. Modele dâhil edilen atık tipleri ve ağırlık yüzdeleri**

Atık Tipleri	Atıkların Ağırlıkça Oranları (%)
Buzdolabı/Soğutucular/İklimlendirme cihazları	21
Büyük beyaz eşyalar (Buzdolabı/soğutucular/iklimlendirme cihazları hariç)	40
Televizyon ve monitörler	26
Küçük ev aletleri, elektrikli ve elektronik aletler, oyuncaklar, spor ve eğlence ekipmanları, izleme ve kontrol aletleri	13

Teşvik alan hurda depoları, toplama noktaları ve atık işleme tesislerinin envanter tutmadığı varsayılmıştır. Atık işleme tesislerinin senede 6.000 ton, hurda depolarının senede 1.300 ton atık sınıflandırabildiği varsayılmıştır. Bu modelde iki tip atık toplama noktası vardır: yönetmelikte belirtildiği üzere ilçe merkezlerindeki nüfus oranına göre açılması gereken belediye toplama noktaları ve dağıtıcıların satış depolarının atık tutmak üzere ayrılan bölümü. Bunların senelik kapasiteleri sırayla 2.000 ton ve 25 tondur.

Çalışma kapsamında ele alınan geri kazanılabilir materyaller/bileşenler şu şekildedir: demir, alüminyum, bakır, plastik, cam ve devre kartları. Kılıç ve diğ. (2015)’nin çalışmasından uyarlanan Tablo 2 her bir atık cinsi için geri kazanılabilir materyal oranlarını göstermektedir. Uygun ekipmanlar kullanılarak ayrıştırılan bu içerikler 2. el hammadde pazarında satılmaktadır. Atıkların içerisinden çıkarılan geri kazanılabilir her bir materyal tipinin kalitesinin aynı olduğu varsayılmıştır. Kullanılan satış fiyatları Tablo 3’de paylaşılmıştır.

Taşıma, bertaraf ve yeni atık işleme tesisi inşaatı sebebiyle açığa çıkan CO<sub>2</sub> emisyonu miktarları Talaei ve diğ. (2016)'nin çalışmasından uyarlanmıştır.



**Şekil 2:**  
Tersine lojistik ağ modeli

AEEE işleme tesisleri için aday noktalar belirlenmiştir ve sistemin ihtiyacına ve belirlenen kısıtlara göre açılma kararları alınmıştır. İlçeler için muhtemel hurda depo noktaları belirlenmiştir. Atık oluşma noktalarında oluşan atıklar 3 şekilde yollarına devam etmektedirler: (1) Vatandaşlar atıklarını direkt olarak toplama noktalarına götürebilirler. (2) AEEE işleyen firmalar bu atıkları oluştukları noktalardan alabilirler ya da atıklar yasa dışı olarak çalışan hurdacılar tarafından alınabilir (3). Toplama noktalarında oluşan atıklar da yine işlenmek üzere lisanslı tesislere ulaştırılabilir. Bu modelde, hurdacılar devlet desteği alıp ön ayrıştırma merkezi olarak değerlendirilebilir olarak düşünülmüştür. Hurda noktalarına gelen atıklar faydalı malzemeleri ayrıştırılmak üzere daha donanımlı olan elektronik atık tesislerine taşınmaktadır. Tesislerde ayrıştırılan geri dönüştürülebilir materyaller 2. el hammadde alıcılarına, zararlı materyaller ise bertaraf tesislerine gönderilmektedir.

**Tablo 2. Atıkların içerisinde yer alan geri kazanılabilir materyallerin oranı (Kılıç ve diğ., 2015)**

Atık Türleri	Atıkların içerisinde yer alan materyaller					
	Demir	Alüminyum	Bakır	Plastik	Cam	Devre kartı
Buzdolabı/Soğutucular/İklimlendirme cihazları	45,75	1,05	2,16	26,02	0	0,11
Büyük beyaz eşyalar (Buzdolabı/soğutucular/iklimlendirme cihazları hariç)	37,98	0,75	2,55	33,71	0	0
Televizyon ve monitörler	7,76	0,24	1,20	12,88	51,44	6,48
Küçük ev aletleri, elektrikli ve elektronik aletler, oyuncaklar, spor ve eğlence ekipmanları, izleme ve kontrol aletleri	20,50	2,50	4,50	22,00	0	0,50

Bu çalışmada ele alınan problem karma tamsayı matematiksel programlama ile modellenmiştir. Modelin matematiksel detayları aşağıdaki gibidir:

**Tablo 3. AEEE'lerden ayrıştırılan materyallerin satış fiyatları**

Materyal	Satış Fiyatları (TL/kg)
Demir	1,12
Alüminyum	6,9
Bakır	22
Plastik	1,5
Cam	0,9
Devre kartları	22

Tanımlanan kümeler:

- $g \in G$  Atık oluşma noktaları kümesi  
 $p \in P$  Atık türleri kümesi  
 $c \in C$  Atık toplanma merkezi kümesi  
 $f \in F$  Atık işleme tesisleri kümesi  
 $d \in D$  Bertaraf merkezi kümesi  
 $t \in T$  Periyotlar kümesi  
 $m \in M$  Malzeme türü kümesi  
 $s \in S$  Yasa dışı atık toplayıcılar kümesi  
 $b \in B$  İkinci el hammadde alıcıları kümesi

*Parametreler*

- $R_{gpt}$   $t$  döneminde  $g$  noktasında ortaya çıkan  $p$  tipi atık miktarı (kg)  
 $c_i$  Atık işleme tesisi  $i \in F$  ve hurda toplama noktası  $i \in S$  atık işleme kapasitesi  
 $tc_{ijt}$   $t$  döneminde  $i$  noktasından  $j$  noktasına,  $(i, j) \in K \vee (i, j) \in L$ , kg başına atık taşıma maliyeti  
 $dc_{dt}$   $t$  döneminde bertaraf tesisi  $d$ 'de kg başına atık bertaraf maliyeti  
 $fc_{ft}$   $t$  döneminde  $f$  atık işleme merkezini açma maliyeti  
 $hc_{fpt}$   $t$  döneminde  $f$  atık işleme merkezinde  $p$  tipi atık işlemenin maliyeti  
 $sc_{spt}$   $t$  döneminde  $s$  hurda noktasında  $p$  tipi atık ayrıştırma maliyeti  
 $rv_{mt}$   $t$  döneminde  $m$  materyalinin mali değeri  
 $ec_{ijt}$   $t$  döneminde  $i$  noktasından  $j$  noktasına,  $(i, j) \in K \vee (i, j) \in L$ , taşınan atığın kg başına çıkardığı CO<sub>2</sub> miktarı  
 $ed$  Bertaraf tesislerinde kg başına açığa çıkan CO<sub>2</sub> miktarı  
 $en$  Yeni atık işleme tesisi açılması durumunda açığa çıkan CO<sub>2</sub> miktarı  
 $sub_{st}$   $t$  döneminde  $s$  hurda noktasını yasallaştırmak ve yetkinleştirmek için gerekli olan teşvik miktarı  
 $q_{pm}$   $p$  ürünü içerisinde geri dönüştürülebilir  $m$  materyali miktarı  
 $bm_t$   $t$  döneminde hurda toplama noktalarına verilebilecek toplam teşvik miktarı  
 $w1_f$   $f$  tesisinin açılması durumunda istihdam edilecek işçi sayısı  
 $w2_s$   $s$  hurda toplama noktasında çalışan hurdacı sayısı  
 $\alpha, \beta, \gamma$  Atık dağılım oranları

$p$  tipi atığın ağ üzerinde ilerlediği kanallar:

$$K = \{(i, j): (i \in G \wedge j \in C) \cup (i \in G \wedge j \in F) \cup (i \in C \wedge j \in F) \cup (i \in G \wedge j \in S) \cup (i \in S \wedge j \in F) \cup (i \in S \wedge j \in D)\}$$

$m$  tipi malzemenin ağ üzerinde ilerlediği kanallar:

$$L = \{(i, j): (i \in F \wedge j \in D) \cup (i \in F \wedge j \in B)\}$$

Karar Değişkenleri

$x_{ijpt}$  :  $t$  döneminde  $i$  noktasından  $j$  noktasına,  $(i, j) \in K$ , taşınan  $p$  ürünü miktarı

$y_{ijmt}$  :  $t$  döneminde  $i$  noktasından  $j$  noktasına,  $(i, j) \in L$ , taşınan  $m$  materyali miktarı

$v_{ft} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } f \text{ atık işleme merkezi } t \text{ döneminde açılırsa} \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases}$

$z_{st} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } s \text{ hurda deposuna } t \text{ döneminde teşvik verilirse} \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases}$

Amaç Fonksiyonları

$$\begin{aligned} \text{Enb } W1 = & \sum_{i \in F} \sum_{j \in B} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} rv_{mt} * y_{ijmt} - \sum_{(i,j) \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} tc_{ijt} * x_{ijpt} \\ & - \sum_{(i,j) \in L} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} tc_{ijmt} * y_{ijmt} - \sum_{i \in G} \sum_{j \in S} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} sc_{jpt} * x_{ijpt} \\ & - \sum_{i \in G} \sum_{j \in F} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} hc_{jpt} * x_{ijpt} - \sum_{i \in C} \sum_{j \in F} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} hc_{jpt} * x_{ijpt} \\ & - \sum_{i \in S} \sum_{j \in D} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} dc_{jpt} * x_{ijpt} - \sum_{i \in F} \sum_{j \in D} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} dc_{jt} * y_{ijmt} \\ & - \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} fc_{ft} * v_{ft} - \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} sub_{st} * z_{st} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Enk } W2 = & \sum_{(i,j) \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} ec_{ijt} * x_{ijpt} - \sum_{(i,j) \in L} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} ec_{ijmt} * y_{ijmt} \\ & - \sum_{i \in S} \sum_{j \in D} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} ed * x_{ijpt} - \sum_{i \in F} \sum_{j \in D} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} ed * y_{ijmt} \\ & - \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} en * v_{ft} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Enb } W3 = \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} w1_f * v_{ft} + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} w2_s * z_{st} \quad (3)$$

Öyle ki;

$$\sum_{j \in S} x_{gjpt} + \sum_{j \in F} x_{gjpt} + \sum_{j \in C} x_{gjpt} = R_{gpt}, \quad \forall p \in P, \forall g \in G, \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{s \in S} x_{gspt} \geq R_{gpt} * \alpha \quad \forall g \in G, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{f \in F} x_{gfpt} \geq R_{gpt} * \beta \quad \forall g \in G, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{i \in G} x_{ispt} * \gamma = \sum_{j \in D} x_{sjpt}, \quad \forall p \in P, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i \in G} x_{ispt} * (1 - \gamma) = \sum_{j \in F} x_{sjpt}, \quad \forall p \in P, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{i \in G} x_{icpt} = \sum_{j \in F} x_{cjpt}, \quad \forall p \in P, \forall c \in C, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{p \in P} \left( \sum_{i \in G} x_{ijpt} + \sum_{i \in C} x_{ijpt} + \sum_{i \in S} x_{ijpt} \right) * q_{pm} = \sum_{b \in B} y_{jbmt}, \quad \forall j \in F, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{p \in P} \left( \sum_{i \in G} x_{ijpt} + \sum_{i \in C} x_{ijpt} + \sum_{i \in S} x_{ijpt} \right) * (1 - q_{pm}) = \sum_{d \in D} y_{jdm}, \quad (11)$$

$$\forall j \in F, \forall m \in M, \forall t \in T$$

$$\sum_{i \in G} \sum_{p \in P} x_{ispt} \leq z_{st} * c_s, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{p \in P} \left( \sum_{i \in G} x_{ijpt} + \sum_{i \in C} x_{ijpt} + \sum_{i \in S} x_{ijpt} \right) \leq v_{ft} * c_j, \quad \forall j \in F, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{i \in G} \sum_{p \in P} x_{icpt} \leq c_c, \quad \forall c \in C, \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{s \in S} sub_{st} * z_{st} \leq bm_t, \quad \forall t \in T \quad (15)$$

$$v_{ft-1} \leq v_{ft}, \quad \forall f \in F, \forall t \in T \quad (16)$$



$$z_{st-1} \leq z_{st}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (17)$$

$$v_{ft}, z_{st} \in \{0,1\}, \quad \forall s \in S, \forall f \in F, \forall t \in T \quad (18)$$

$$x_{ijpt} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in K, \forall p \in P, \forall t \in T, \quad y_{ijmt} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in L, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (19)$$

Modelin birinci amacı çeşitli maliyet kalemlerinden ve elde edilen gelirlerden oluşmaktadır. Toplam kârın enbüyüklenmesi hedeflenmektedir. Birinci terim geri kazanılabilir materyallerin 2. el pazarında satılması sonucu elde edilebilecek geliri göstermektedir. İkinci ve üçüncü terim taşıma maliyetlerini, dördüncü terim hurda depolarında atık sınıflandırma maliyetlerini, beşinci ve altıncı terim işleme tesislerinde atık işleme maliyetini, yedinci ve sekizinci terim de bertaraf maliyetlerini temsil etmektedir. Dokuzuncu terim tesis açma maliyetlerini gösterirken son terim de harcanan toplam teşvik miktarını göstermektedir. Modelin ikinci amacı taşıma, bertaraf aktiviteleri ve yeni işleme tesisi yapımı sırasında açığa çıkan CO<sub>2</sub> emisyonunu enküçükmektir. Modelin üçüncü amacı da elektronik atık işleme tesisi açıldığında ve hurda tesislerine devlet yatırımı yapıldığında istihdam edilecek toplam kişi sayısını enbüyüklemektir. (4) numaralı kısıt ile her bir ilçe merkezinde oluşan atık miktarlarının ağa katılması sağlanmıştır. (5) ve (6) numaralı kısıtlar ile sırasıyla ilçe merkezlerinden hurda noktalarına ve atık işleme tesislerine gidecek atık miktarı için alt limit belirlenmiştir. (7) numaralı kısıt ile yasallaşan hurda deposunda ön değerlendirmeden geçen ve bertaraf edilmesi gereken atıklar belirlenirken, (8) numaralı kısıt ile kalan atıkların işlenmek üzere atık işleme tesislerine gönderilmesi sağlanmıştır. (9) numaralı kısıt toplama noktaları için akış dengesi kısıtıdır. (10) numaralı kısıt ile atık işleme merkezine gelen ürünlerin içerisindeki faydalı materyaller ikinci el hammadde alıcılarına gönderilirken, geri kalan materyallerin bertaraf için bertaraf tesislerine gönderilmesi (11) numaralı kısıt ile sağlanmaktadır. (12), (13) ve (14) numaralı kısıtlar sırasıyla hurdacı depoları, atık işleme tesisleri ve atık toplama noktaları için kapasite kısıtlarıdır. Hurdacı depolarına yapılacak yatırımlar için bütçe kısıtı (15) numaralı kısıttır. (16) numaralı kısıt ile bir tesisin sadece bir periyotta açılmasına karar verildikten sonra dönem sonuna kadar açık kalması sağlanırken (17) numaralı kısıt ile bir hurda deposunun teşvik aldıktan sonra konumunu devam ettirmesi hedeflenmiştir. Karar değişkenlerinin matematiksel tipleri (18) ve (19) numaralı kısıtlarla tanımlanmıştır.

#### 4. ÇÖZÜM

Önerilen model hem atık sisteminin toplam kârını hem de işçi istihdamı ile sosyal faydayı enbüyüklerken hem de CO<sub>2</sub> emisyonunu enküçükmeyi hedeflemektedir. Literatürde çok amaçlı problemlerin çözümü için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bunlardan bazıları şunlardır: hedef programlama, epsilon kısıtı, değer fonksiyonu ve ağırlıklandırma tekniğidir (Deb, 2001). Bu çalışmada, çözüm metodu olarak epsilon kısıtı yöntemi seçilmiştir. Epsilon kısıtı yönteminde modelin amaçlarından birisi kriter amaç fonksiyonu seçilirken, diğer amaçlar sınır koyan kısıtlar olarak modele eklenir (Lokman, 2017; Mavrotas, 2009). (20) ve (21) numaralı ifadeler çok amaçlı matematiksel programlama problemini tasvir etmektedir.  $f_1(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x})$  amaç fonksiyonlarının karar değişkenlerini temsil eden vektör  $\mathbf{x}$  iken, olurlu bölge  $S'$  dir.

$$\text{Enb } (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x})) \quad (20)$$

$$\text{Öyle ki; } \mathbf{x} \in S \quad (21)$$

Epsilon kısıtı yönteminin uygulanması ile problem, (22) ve (23) numaralı ifadelerde gösterildiği gibi yeniden modellenmektedir.

$$\text{Enb } f_1(\mathbf{x}) \quad (22)$$

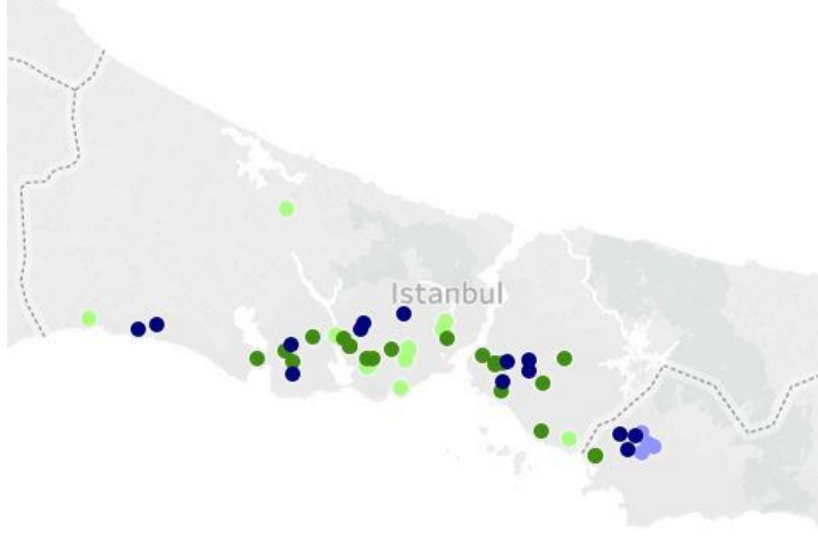
$$f_2(\mathbf{x}) \geq e_2, f_3(\mathbf{x}) \geq e_3, \dots, f_p(\mathbf{x}) \geq e_p, \mathbf{x} \in S \quad (23)$$

Yukarıda paylaşılan genel gösterime uymak adına çalışmanın ikinci amaç fonksiyonu eksi ile çarpılmıştır. Önerilen model için kriter amaç fonksiyonu, gerçek uygulamalarla paralellik gösterecek şekilde, kâr odaklı olan birinci amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Diğer bir deyişle, her ne kadar sürdürülebilirlik kavramının önemi firmalar ve devletler tarafından daha iyi anlaşılrsa da, pratikte sistemin mümkün olan en yüksek seviyede kâr edebiliyor olması beklenmektedir. Bu sebeple modelde çevresel ve sosyal amaçlar sınır koyan kısıtlar olarak tanımlanmıştır. Önerilen model İstanbul iline uygulanmıştır. Yatırım yapılabilecek hurda depoları her ilçeden en azından bir adet olacak şekildedir ve bu çalışma için 40 adet olarak belirlenmiştir. Atık işleme tesisleri de İstanbul Organize Sanayi Bölgelerini de içerecek şekilde 18 adet olarak belirlenmiştir. Farklı epsilon değerleri için senaryolaştırılan model, 17 işlemcili ve 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda IBM ILOG CPLEX Optimizasyon Studio 12.6.3 optimizasyon yazılımı kullanılarak çözdürülmüştür. Her birine ortalama 5 dakika içinde ulaşılan 27 farklı çözüm elde edilmiştir.

Bu çalışmada ortaya çıkması beklenen atıkları toplanma oranlarının %50, %75, %100 olduğu durumlar incelenmiştir ve ayrıca 3 farklı devlet teşviki miktarı için deneyler gerçekleştirilmiştir. Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da hurdacılara sırasıyla senelik 750.000 TL, 1.000.000, 1.250.000 TL ayrılması durumunda gözlenen sonuçlar vardır.

Tablo 4, 5 ve 6'da gösterilen 1. epsilon değeri elektronik atıkların geri kazanım ve bertaraf aktivitelerinin sonucunda ortaya çıkması beklenen en yüksek CO<sub>2</sub> miktarını ifade etmektedir. 2. epsilon değeri ise istenen en küçük istidam seviyesi anlamına gelmektedir. Yani, yeni bir AEEE işleme tesisi açılması ve hurdacıların teşvik ile yasallaşması sonucu sigortalı olarak göreve başlayacak toplam kişi sayısı için asgari miktardır. Epsilon değerlerine karar vermek için ilk olarak tüm amaç fonksiyonları için problem ayrı ayrı çözülmüştür ve o çözüm için diğer amaç fonksiyonlarının değerleri de ayrıca hesaplanmıştır. Böylelikle amaç fonksiyonlarının değer aralıkları elde edilmiştir ve bu aralıklarda olacak şekilde epsilon değerlerine karar verilmiştir. Kriter amaç fonksiyonunun değeri sütunu oluşturulan senaryolar için elde edilebilecek en büyük kârı göstermektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde şu vargılara ulaşılmaktadır: Yönetmeliğin belirttiği ve çalışmamızda önerilen kişi başı hedeflere ulaşılması durumunda, tüm AEEE geri kazanım ağının toplam kârı 72 milyon TL'ye kadar ulaşabilmektedir ve bu şartlar altında en azından 14 adet AEEE işleme tesisine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 3'teki haritada Tablo 5'in ilk senaryosu için olan çözüm paylaşılmıştır. Lacivert noktalar açılacak tesisleri, koyu yeşil noktalar da teşvik alabilecek hurdacıları göstermektedir. İstihdamı arttırmak istediğimizde daha çok tesis açılmalı ve/veya daha fazla hurda ve hurda deposu atık sistemine katılmalıdır. Tablo 4, 5 ve 6 kıyasladığında şu sonuca ulaşılmaktadır: daha fazla tesis açılması durumunda emisyon miktarı artacağından dolayı model, yeteri kadar teşvik olması durumunda, hurdacı istihdamını enbüyüklemeye çalışmaktadır. Örnek vermek gerekirse, Tablo 4 ve Tablo 6'da atık toplama oranlarının %100 olduğu ilk satırdaki çözümlere bakılabilir. . Bu çözümlerde epsilon değerleri aynıdır. Tablo 6'da paylaşılan çözümün değeri 72.739.367 TL ve açığa çıkması beklenen CO<sub>2</sub> miktarı ise 84.934 kg'dır. Açılan atık işleme tesisi ile istihdam edilen kişi sayısı 560, sigortalı olarak çalışmaya başlayan hurdacı sayısı ise 240'tır. Tablo 6'da paylaşılan çözümün değeri 72.739.323 TL ve açığa çıkması beklenen CO<sub>2</sub> miktarı ise 87.283 kg'dır. Açılan atık işleme tesisi ile istihdam edilen kişi sayısı 600, sigortalı olarak çalışmaya başlayan

hurdacı sayısı ise 220'dir. Ayrıca, kişi başı toplama hedeflerine %75 oranında ulaşıldığında açılması gereken asgari AEEE işleme tesisi 11 adetken, %50 oranında ulaşıldığında ise 7 adettir.



**Şekil 3:**  
Seçilen bir senaryo için açılan tesisler ve teşvik alan hurdacılar

Birinci amaç fonksiyonunun kısımlarını incelediğimizde bertaraf ve atık işleme maliyetlerinin, toplam maliyetlerin büyük kısmını oluşturduğu görülmektedir. Çalışma İstanbul ili için sınırlı tutulduğundan taşıma maliyetleri yüksek çıkmamıştır. Bir başka gözlem de hurdacılara ayrılacak teşvik kararı ile ilgilidir. Model, istihdam için alt sınır tanımlayan epsilon kısıtı ya da (5) numaralı kısıt ile zorlanmadığı takdirde hurdacılara teşvik verilmesi kararı almama eğilimindedir. Bunun sebebi de ortaya çıkan atıkların hurda depolarına ya da toplanma merkezlerine uğramadan işleme tesislerine gitmesinin ekonomik olarak daha kârlı olmasıdır.

**Tablo 4. Hurdacı teşvikinin yıllık 750.000 TL olduğu senaryolar**

Atık toplanma oranları	Birinci epsilon değeri (Emisyon için üst sınır)	İkinci epsilon değeri (İstihdam için alt sınır)	Kriter amaç fonksiyonunun değeri (TL)	İkinci amaç fonksiyonunun değeri (kg)	Üçüncü amaç fonksiyonunun değeri (Kişi)
100%	90.000	800	72.339.323	87.283	820
	92.000	900	70.742.568	91.983	900
	95.000	920	70.141.904	94.333	930
75%	70.000	700	53.483.009	67.156	700
	75.000	800	51.083.030	74.206	820
	80.000	900	49.483.030	78.906,42	900
50%	45.000	500	35.193.322	44.755,79	500
	45.000	400	36.985.745	42.406,35	410
	50.000	600	33.203.843	49.455,01	600

**Tablo 5. Hurdacı teşvikinin yıllık 1.000.000 TL olduğu senaryolar**

Atık toplanma oranları	Birinci epsilon değeri (Emisyon için üst sınır)	İkinci epsilon değeri (İstihdam için alt sınır)	Kriter amaç fonksiyonunun değeri (TL)	İkinci amaç fonksiyonunun değeri (Kg)	Üçüncü amaç fonksiyonunun değeri (Kişi)
100%	90.000	800	72.739.367	84.934	800
	90.000	900	70.739.366	87.284	900
	95.000	1.000	68.742.591	94.333	1.000
75%	70.000	700	53.483.031	67.157	700
	70.000	800	51.083.009	69.507	820
	75.000	900	49.483.031	74.207	900
50%	43.000	400	36.985.745	42.407	410
	45.000	500	35.193.322	44.756	500
	45.000	600	32.993.423	44.756	610

**Tablo 6. Hurdacı teşvikinin yıllık 1.250.000 TL olduğu senaryolar**

Atık toplanma oranları	Birinci epsilon değeri (Emisyon için üst sınır)	İkinci epsilon değeri (İstihdam için alt sınır)	Kriter amaç fonksiyonunun değeri (TL)	İkinci amaç fonksiyonunun değeri (Kg)	Üçüncü amaç fonksiyonunun değeri (Kişi)
100%	90.000	800	72.739.367	84.934	800
	90.000	900	70.739.367	84.934	900
	90.000	1.000	68.542.539	89.634	1.010
75%	70.000	700	53.283.031	67.157	710
	70.000	800	51.483.031	67.157	800
	75.000	900	49.483.009	71.856	900
50%	43.000	400	36.985.745	42.406	410
	45.000	500	35.193.322	44.755	500
	45.000	600	32.993.322	44.755	610

## 5. SONUÇLAR

Atık elektrikli ve elektronik eşyalar yükselmekte olan nüfus ve teknoloji kullanım oranlarıyla beraber son yıllarda hızla artmaktadır. Bu atıklar hem değerli materyaller içerirken hem de çevre ve insan sağlığını ciddi oranda tehdit eden materyaller barındırmaktadır. Bu sebeple doğru şekilde toplanması, depolanması, işlenmesi ve bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bu atıkların uygun şekilde yönetilebilmesi için dünyanın farklı ülkelerinde yönetmelikler yayınlanmıştır. Fakat yasa dışı olarak AEEE toplayan hurdacılar vardır. Özellikle İstanbul ili gibi göç alan ve gelir eşitsizliğinin fazla olduğu kentlerde bu durum daha da yaygındır. O yüzden devlet desteği ile bu hurdacıların atık geri kazanım sistemine dâhil edilmeleri oldukça önemlidir.

Gelecek çalışmalarda devlet desteği ile sisteme kazandırılan hurdacıların gayri safi milli hasılaya olan katkıları incelenebilir. Ayrıca sisteme kazandırılmayan hurdacıların çalıştıkları uygunsuz koşullardan etkilenme durumlarını yansıtan bir parametre geliştirilebilir. Çalışmamızda toplama aktiviteleri dikkate alınmamış ve ortaya çıkan tüm atıkların ilçe merkezlerinde toplandığı varsayılmıştır. Sonraki çalışmalarda atık toplama uygulamaları ve maliyetleri de modele dâhil edilebilir. Bir başka varsayım geri kazanılabilir materyallerin kalitesinin aynı olduğudur. Gerçekte toplanan atık miktarları ve kaliteleri belirsizdir. Model, bu parametrelerin belirsizlikleri göz önüne alınarak geliştirilebilir. Benzer şekilde geri kazanılabilir materyallerin satış fiyatları bulanık veya stokastik parametreler olarak modele eklenebilir ve sistemin genel performansı daha detaylı incelenebilir.

## KAYNAKLAR

1. Achilles, C., Vlachokostas, C., Aidonis, D., Moussiopoulos, N., Iakovou, E., & Banias, G. (2010). Optimising reverse logistics network to support policy-making in the case of electrical and electronic equipment. *Waste Management*, 30(12), 2592-2600. doi: 10.1016/j.wasman.2010.06.022
2. Alshamsi, A., & Diabat, A. (2017). A Genetic Algorithm for Reverse Logistics network design: A case study from the GCC. *Journal of Cleaner Production*, 151, 652-669. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.096
3. Ayvaz, B., Bolat, B., & Aydın, N. (2015). Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment. *Resources, conservation and recycling*, 104, 391-404. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.07.006
4. Deb, K. (2005). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Wiley. ISBN: 978-0-471-87339-6
5. El Korchi, A., Millet, D. (2011). Designing a sustainable reverse logistics channel: the 18 generic structures framework. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 588-597. doi: 10.1016/j.jclepro.2010.11.013
6. Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokoo, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 108-141. doi: 10.1016/j.ejor.2017.04.009
7. Govindan, K., Paam, P., & Abtahi, A. R. (2016). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological indicators*, 67, 753-768. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.03.017
8. H. Yu and W. D. Solvang, "A new two-stage stochastic model for reverse logistics network design under government subsidy and low-carbon emission requirement," in *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2017 IEEE International Conference on, pp. 90-94, IEEE, 2017. doi: 10.1109/IEEM.2017.8289857
9. Kannan, D., Diabat, A., Alrefaei, M., Govindan, K., & Yong, G. (2012). A carbon footprint based reverse logistics network design model. *Resources, conservation and recycling*, 67, 75-79. doi: 10.1016/j.resconrec.2012.03.005
10. Kilic, H. S., Cebeci, U., & Ayhan, M. B. (2015). Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (WEEE) in Turkey. *Resources, Conservation and Recycling*, 95, 120-132. doi: 10.1016/j.resconrec.2014.12.010
11. Lieckens, K., & Vandaele, N. (2007). Reverse logistics network design with stochastic lead times. *Computers & Operations Research*, 34(2), 395-416. doi: 10.1016/j.cor.2005.03.006

12. Lokman, B. (2017). Çok Amaçlı Tamsayı Programlama Problemleri için Temsili Çözüm Üreten Yaklaşımların ve Kalite Ölçülerinin İncelenmesi. *Journal of Industrial Engineering (Turkish Chamber of Mechanical Engineers)*, 28(1),19-39.
13. M. Talaei, B. F. Moghaddam, M. S. Pishvae, A. Bozorgi-Amiri, and S. Gholamnejad, “A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 113, pp. 662–673, 2016. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.074
14. Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465. doi: 10.1016/j.amc.2009.03.037
15. Pishvae, M. S., Farahani, R. Z., & Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & operations research*, 37(6), 1100-1112. doi: 10.1016/j.cor.2009.09.018
16. REC (Regional Environment Center-Turkey) 2012. *Regulatory Impact Assessment of EU Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive (2002/96/EC)*.
17. REC (Regional Environment Center-Turkey) 2016. *Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi*. ISBN: 978-975-6180-45-7
18. Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1063-1077. doi: 10.1016/j.ejor.2005.05.032
19. Temur, G. T., & Bolat, B. (2017). Evaluating efforts to build sustainable WEEE reverse logistics network design: comparison of regulatory and non-regulatory approaches. *International Journal of Sustainable Engineering*, 10(6), 358-383. doi: 10.1080/19397038.2017.1379572
20. Ye, T., & Zhenhua, Y. (2014). Reverse logistics network: A literature review. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6(7), 1916-1921.