

ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK ATIKLAR İÇİN TERSİNE LOJİSTİK AĞ TASARIMI: İSTANBUL ÖRNEĞİ

Özlem Karadeniz Alver¹, Berk Ayvaz², Bülent Çatay³

¹Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul, okaradeniz@sabanciuniv.edu

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul, bayvaz@ticaret.edu.tr

³ Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul, catay@sabanciuniv.edu

ÖZET

Bu çalışmada, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı AEEE Kontrolü Yönetmeliği'ne göre İstanbul ilinde toplanması gereken Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar (AEEE) için çok amaçlı karma tamsayı programlama modeli oluşturulmuştur. Model, sürdürülebilirlik kavramının üç temel hedefinden (ekonomik, çevresel ve sosyal) yola çıkarak, yönetmeliğin gerektirdikleri ve sorumlu paydaşların yükümlülükleri baz alınarak tasarlanmıştır. Fakat yönetmeliğe rağmen yasa dışı olarak AEEE toplayan ve ayrıştıran hurdacılar mevcuttur. Bu tip atıklar insan sağlığına oldukça zararlı olabildiğinden, gerekli ekipmanları olmayan hurdacılar için risk oluşturmaktadır. Buradan yola çıkarak modelde sosyal amaç, AEEE toplayan hurdacıların, yapılacak devlet yatırımı ile istihdam edilerek sağlıklarının garanti altına alınması ve sosyal statülerinin artırılmasıdır. Modelin diğer amacı da tersine lojistik aktivitelerin çevresel etkilerinin ve maliyetinin enküçüklenmesidir. Önerilen model epsilon kısıt yöntemi ile çözülmüş ve açılacak elektronik atık işleme tesislerine ve yatırım yapılarak AEEE geri kazanım sistemine dahil edilecek hurda depolarına karar verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tersine lojistik, Ağ tasarımı, AEEE, Sosyal amaç

REVERSE LOGISTICS NETWORK DESIGN FOR WASTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENTS: THE CASE OF ISTANBUL

ABSTRACT

In this study, a multi-objective mix integer programming model is proposed for the collection of Waste of Electric and Electronic Equipments (WEEE) for Istanbul, based on the requirement set by Ministry of Environment and Urbanization WEEE Directive. This model is derived from both WEEE Directive of Turkey and three aspects of sustainability (economic, environmental and social). Even though responsibilities of related authorities are stated, illegal WEEE collectors still exist. These illegal collectors do not usually have necessary equipments and valid conditions for the treatment of WEEE which may cause significant health issues. Considering this fact, we chose the employment of illegal WEEE scrap dealers as the social objective of the model. Furthermore, the second objective of the model is to minimize the cost and environmental effects of reverse logistics activities. The proposed model has been solved using epsilon constraint method and it is decided to open WEEE treatment facilities and subsidise the scrap dealer junkyards which will be included in WEEE recovery system.

Keywords: Reverse logistics, Network design, WEEE, Social objective

1. GİRİŞ

Hızla artmakta olan nüfusla beraber tüketim seviyesi de yükselmektedir ve bunun sonucu olarak da doğal kaynakların sürdürülebilirliği konusu endüstrileşmiş toplumlar için hayati önem taşımaya başlamıştır. Bir taraftan dünya üzerindeki doğal kaynaklar azalırken insanoğlunun ürettiği atık miktarı da artmaktadır (Kılıç vd., 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 materyaller barındırırken hem de uygun şekilde bertaraf edilmediğinde insan sağlığını ve yaşadığımız çevreyi tehdit edebilecek materyaller içermektedir (Achillas vd., 2010).

Belirtilen sebeplerden ötürü bir çok 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 arttırmak 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 paydaşların yükümlülükleri belirtilmiştir. Fakat yasa dışı olarak AEEE toplayan ve işleyen hurdacılar da mevcuttur. 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 de 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 imkanlarını artırılıp ön sınıflandırma tesisi olarak atık geri kazanım ve bertaraf sistemine dahil edilmesi hedeflenmiştir. 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 hurdacılara 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 ARAŞTIRMASI

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 mücadeleyle ilişkin lojistik operasyonları tersine lojistiğin kapsamındadır (Govindan, vd., 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 bir 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 vd. (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 vd. (2015) miktar, kalite ve taşıma maliyeti belirsizlikleri altında iki aşamalı stokastik programlama modeli önermişlerdir. Model Türkiye'de faaliyet gösteren elektrikli ve elektronik atık geri dönüşümü yapan bir firma için örneklem ortalama yaklaşımı yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Salema vd. (2007) talep ve geri dönen ürün miktarı belirsizliklerini dikkate alan kapasite kısıtlı genel bir ağ tasarımı modeli geliştirmişlerdir. Ortaya konan karma tamsayı formülasyonu dal-sınır yöntemi ile çözümlenmiştir.

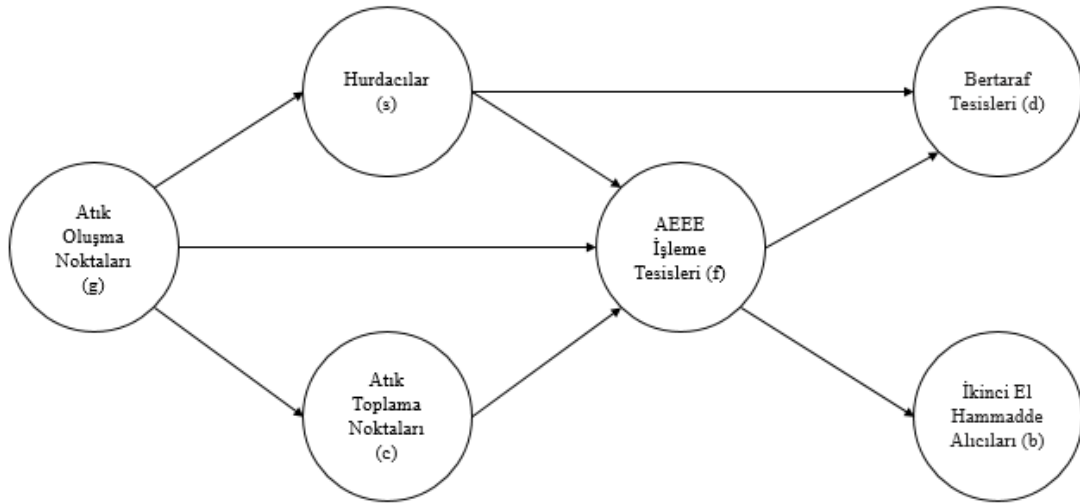
Ekonomik amaca ek olarak, ağ tasarımı problemleri, artan çevresel bilinç ve yürürlüğe giren yönetmeliklere bağlı olarak farklı hedefleri içerebilir. Bu durum araştırmacıların da çok amaçlı modeller geliştirmesinin önünü açmıştır (Pishvaei vd., 2010). Govindan vd. (2016) sürdürülebilirliğin üç boyutunu (ekonomik, sosyal ve çevresel) hesaba katarak bulanık matematiksel programlama modeli kullanmış ve çok amaçlı parçacık sürü algoritması uygulanmıştır. Kannan vd. (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.

Govindan vd. (2017) belirsizlikler altında geleneksel tedarik zinciri tasarımı ve tersine lojistik ağ tasarımı modellerini incelemişlerdir. Çalışma, tersine lojistik ağ tasarımı modellerinin çok az bir kısmının çok amaçlı olarak tasarlandığını

ortaya koymaktadır. Bu çalışma ise maliyete ek olarak çevresel etki ve sosyal faydayı da hesaba katan çok amaçlı bir model niteliği taşımaktadır.

3. ÖNERİLEN MODEL

Bu çalışmada, 4 farklı tip atık elektrikli ve elektronik eşya için çok periyotlu tersine lojistik ağ tasarımı problemi ele alınmıştır ve İstanbul ili için uygulanmıştır. Problemin bileşenleri, Şekil 1’de gösterildiği gibi atık oluşma noktaları, atık toplama noktaları, atık işleme tesisleri, hurdacılar, atık bertaraf noktaları, zararlı atık bertaraf tesisleri ve 2. el hammadde alıcılarıdır. Atıkların oluşma noktaları, ilçe merkezleri olarak kabul edilmiştir. Bu noktalarda oluşan atık miktarları, AEEE Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi’nde belirtilen toplama hedefleri olarak kabul edilmiştir. Yönetmeliğe uygun olacak şekilde, belediyelerin birer getirme merkezi olduğu ve EEE dağıtıcılarının satış yerlerinin bir bölümünü AEEE depolamak için kullandıkları varsayılmıştır. AEEE işleme tesisleri için aday noktalar belirlenmiştir ve sistemin ihtiyacına ve belirlenen kısıtlara göre açılma kararları alınmıştır. İlçeler için muhtemel hurdacı 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 oluştuğu 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 ile yatırım alıp ön ayrıştırma deposu olarak değerlendirilebilir olarak düşünülmüştür. Hurda noktalarına gelen atıklar faydalı materyalleri ayrıştırılmak üzere daha donanımlı olan elektronik atık tesislerine taşınmaktadır. Tesislerde ayrıştırılan geri dönüştürülebilir materyaller 2. el hammadde alıcılarına, zararlı materyaller ise bertaraf tesislerine gönderilmektedir.



Şekil 1: Tersine Lojistik Ağ Modeli

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

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
- ec_{ijt} t döneminde i noktasından j noktasına, $(i,j) \in K \vee (i,j) \in L$, taşınan atığın kg başına çıkardığı CO₂'nin maliyeti
- dc_{dt} t döneminde bertaraf tesisi d de atık bertaraf maliyeti
- fc_{ft} t döneminde f atık işleme merkezi açmanın maliyeti
- rV_{mt} t döneminde m materyalinin mali değeri

inv_{st} t döneminde s hurda noktasını yasallaştırmak ve yetkinleştirmek için gerekli olan yatırım miktarı
 q_{pm} p ürünü içerisinde geri dönüştürülebilir m materyali miktarı
 bm_t t döneminde hurda toplama noktalarına yapılabilecek toplam yatırım miktarı
 $w1_f$ f tesisinin açılması durumunda istihdam edilecek işçi sayısı
 $w2_s$ s hurda toplama noktasında çalışan hurdacı sayısı
 α, β, γ Atık dağılım oranları

p tipi atığın ağ üzerinde geçtiği 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 geçtiği kanallar:

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

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} = $\begin{cases} 1, & \text{Eğer atık işleme merkezi } f \text{ } t \text{ döneminde açılırsa} \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases}$
 z_{st} = $\begin{cases} 1, & \text{Eğer hurda merkezine } s' \text{ ye } t \text{ döneminde yatırım yapılırsa} \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases}$

Amaç Fonksiyonları

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

$$\text{Enb W2} = \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} w1_f * v_{ft} + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} w2_s * z_{st} \quad (2)$$

Öyle ki;

$$\sum_{j \in S} x_{ijpt} + \sum_{j \in F} x_{ijpt} + \sum_{j \in G} x_{ijpt} = R_{gpt}, \quad \forall p \in P, \forall g \in G, \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{c \in C} x_{gcpt} \geq R_{gpt} * \alpha \quad \forall g \in G, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{f \in F} x_{gfpt} \geq R_{gpt} * \beta \quad \forall g \in G, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{i \in G} x_{ispt} * \gamma = \sum_{j \in D} x_{sjpt}, \quad \forall p \in P, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{i \in G} x_{ispt} * (1 - \gamma) = \sum_{j \in F} x_{sjpt}, \quad \forall p \in P, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i \in G} x_{icpt} = \sum_{j \in F} x_{cjpt}, \quad \forall p \in P, \forall c \in C, \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{p \in P} \left(\sum_{i \in G} x_{ijpt} + \sum_{i \in C} x_{ijpt} + \sum_{i \in S} x_{ijpt} \right) * q_{pm} = \sum_{b \in B} y_{jbmt}, \quad \forall j \in F, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{p \in P} \left(\sum_{i \in G} x_{ijpt} + \sum_{i \in C} x_{ijpt} + \sum_{i \in S} x_{ijpt} \right) * (1 - q_{pm}) = \sum_{d \in D} y_{jdm}, \quad \forall j \in F, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{i \in G} \sum_{p \in P} x_{ispt} \leq z_{st} * c_s, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{p \in P} \left(\sum_{i \in G} x_{ijpt} + \sum_{i \in C} x_{ijpt} + \sum_{i \in S} x_{ijpt} \right) \leq v_{ft} * c_f, \quad \forall j \in F, \forall t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{i \in G} \sum_{p \in P} x_{icpt} \leq c_c, \quad \forall c \in C, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{s \in S} inv_{st} * z_{st} \leq bm_t, \quad \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{t \in T} v_{ft} \leq 1, \quad \forall f \in F \quad (15)$$

$$\sum_{t \in T} z_{st} \leq 1, \quad \forall s \in S \quad (16)$$

$$v_{ft}, z_{st} \in \{0,1\}, \quad \forall s \in S, \forall f \in F, \forall t \in T \quad (17)$$

$$x_{ijpt} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in K, \forall p \in P, \forall t \in T, \quad y_{ijmt} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in L, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (18)$$

Modelin birinci amacı sistem maliyetlerinden ve elde edilen gelirlerden oluşmaktadır ve toplam maliyetin enküçüklenmesi hedeflenmektedir. Amaç fonksiyonundaki birinci ve ikinci ifade taşıma maliyetini ve taşıma sırasında açığa çıkan CO₂'nin maliyeti göstermektedir. Üçüncü ve dördüncü ifadeler toplam atık bertaraf maliyetleridir. Beşinci terim toplam tesis açma maliyeti, altıncı terim hurdacılara yapılan yatırımın toplam miktarını ifade etmektedir. Son terim ise geri kazanılan materyallerin getirdiği geliri ifade etmektedir. Modelin ikinci amacı da elektronik atık işleme tesisi açıldığında ve hurda tesislerine devlet yatırımı yapıldığında istihdam edilecek kişi sayısını enbüyüklemektir. (3) numaralı kısıt ile her bir ilçe merkezinde oluşan atık miktarlarının ağa katılması sağlanmıştır. (4) ve (5) numaralı kısıtlar ilçe merkezlerinden toplama noktalarına ve atık işleme tesislerine gidecek atık miktarı için alt limit belirlenmiştir. (6) numaralı kısıt ile yasallaşan hurda deposunda ön değerlendirmeden geçen ve bertaraf edilmesi gereken atıklar belirlenirken, (7) numaralı kısıt ile kalan atıkların işlenmek üzere atık işleme tesislerine gönderilmesi sağlanmıştır. (8) numaralı kısıt toplama noktaları için akış dengesi kısıtıdır. (9) numaralı kısıt ile atık işleme merkezine gelen ürünlerin içerisindeki faydalı materyaller ikinci el hammadde alıcılarına gönderilirken, geri kalan materyallerin bertaraf için bertaraf tesislerine gönderilmesi (10) numaralı kısıt ile sağlanmaktadır. (11), (12) ve (13) nolu kısıtlar sırasıyla hurdacı depoları, atık işleme tesisleri ve atık toplama noktaları için kapasite kısıtlarıdır. Hurdacı depolarına yapılacak yatırımlar için bütçe kısıtı (14) numaralı kısıttır. (15) numaralı kısıt ile bir tesisin sadece bir periyotta açılacağı ifade edilirken, (16) numaralı kısıt ile bir hurda deposunun sadece bir periyotta devlet yatırımı alabileceği garanti edilmiştir. Karar değişkenlerinin matematiksel tipleri (17) ve (18) nolu kısıtlarla tanımlanmıştır.

4. ÇÖZÜM

Önerilen model hem maliyet enküçüklemesini hem de işçi istihdamı ile sosyal faydayı enbüyüklemeyi hedeflemektedir. 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). (19) ve (20) 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.

$$\text{Enb } (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x})) \quad (19)$$

$$\text{Öyle ki; } \mathbf{x} \in S \quad (20)$$

Epsilon kısıtı yönteminin uygulanması ile problem, (21) ve (22) numaralı ifadelerde gösterildiği gibi yeniden modellenmektedir.

$$\text{Enb } f_1(\mathbf{x}) \quad (21)$$

$$f_2(\mathbf{x}) \geq e_2, f_3(\mathbf{x}) \geq e_3, \dots, f_p(\mathbf{x}) \geq e_p, \mathbf{x} \in S \quad (22)$$

Yukarıda paylaşılan genel gösterime uymak adına çalışmanın birinci amaç fonksiyonu eksi ile çarpılarak kâr enbüyüklenmesi hedeflenmiştir. Önerilen model için kriter amaç fonksiyonu sosyal fayda odaklı olan ikinci amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Birinci amaç ise sınır koyan kısıt olarak tanımlanmıştır. Önerilen model İstanbul iline uygulanmıştır. Adalar ilçesinde ortaya çıkan atık miktarı Tuzla Belediyesine eklenmiştir, toplam atık oluşma noktası sayısı 38 adettir. Yatırım yapılabilecek hurdacı depoları İstanbul'un farklı ilçelerinden seçilmiştir ve bu çalışma için sayısı 40 olarak belirlenmiştir. Atık işleme tesisleri de İstanbul Organize Sanayi Bölgelerini de içerecek şekilde 18 adet olarak belirlenmiştir. Farklı epsilon değerleri için senaryolaştırılan model, 15 işlemcili ve 4 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda IBM ILOG CPLEX Optimizasyon Studio 12.6.3 optimizasyon yazılımı kullanılarak çözdürülmüştür.

Bu çalışmada 3 farklı epsilon değeri belirlemiştir. Ayrıca iki farklı β değeri için toplamda 6 farklı senaryo seçilmiştir. 1-3 numaralı senaryolar ve 4-6 numaralı senaryolar için farklı β değerleri tanımlanmıştır. Bu sayede açığa çıkan atıkların direk olarak işleme tesislerine gitmesi durumunda sistemin kârlılık seviyesinin ne şekilde değişeceği incelenmiştir, fakat bahsi geçen senaryolar için belirgin bir ilişkiye rastlanmamıştır. Tablo 1'de gösterilen epsilon değerleri elektronik atıkların geri kazanımı sonucunda elde edilmek istenen asgari kârı ifade etmektedir. İstihdam Edilecek Kişi Sayısı AEEE işleme tesisi açılması ve hurdacıların yasallaştırılması sonucu sigortalı olarak göreve başlayan toplam çalışan sayısını göstermektedir. Elde Edilen Gelir sütünü atıkların içindeki geri dönüştürülebilir materyallerin hammadde olarak geri kazanılması sonucu elde edilecek geliri gösterirken, toplam maliyet sütünü tüm tersine lojistik aktiviteleri sırasında ortaya çıkan maliyetlerin tümünü yansıtmaktadır.

Tablo 1 : Senaryolara göre istihdam ve maliyet analizi

Senaryo Numarası	Epsilon Değeri	İstihdam Edilecek Kişi Sayısı	Elde Edilen Gelir	Toplam Maliyet
1	430.000.000,00	730,00	682.561.149,00	252.561.149,00
2	425.000.000,00	820,00	682.561.149,00	257.561.149,00
3	420.000.000,00	820,00	682.561.149,00	262.561.149,00
4	430.000.000,00	660,00	682.446.620,00	252.446.620,00
5	425.000.000,00	820,00	682.561.149,00	257.561.149,00
6	420.000.000,00	820,00	682.561.149,00	262.561.149,00

Tablo 2'de ise senaryolara göre açılması gereken AEEE işleme tesisleri ve belirlenen yatırım kapasitesine göre AEEE sistemine dahil edilebilecek hurdacılar belirtilmiştir. Çözülen modele göre AEEE toplama hedeflerinin artmasıyla beraber, varolan işleme tesislerinin sayılarının yetersiz kalabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, devlet desteği ile geri dönüşüm ağına kazandırılması gereken hurdacı probleminin çözülebilmemesinin de önemli yatırımlar ile olabileceği çıkarımı yapılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

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 barındırmaktadırlar. Bu sebeple doğru şekilde toplanması, depolanması, işlenmesi ve bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bu atıkların uygun şekilde yönetilebilmesi için dünyanın değişik ülkelerinde yönetmelikler yayınlanmaktadır. 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 dahil 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.

Tablo 2: Senaryolar için ikili değişkenleri aldıkları değerler

Senaryo Numarası	Açılacak Tesisler	Sisteme Dahil Edilecek Hurdacılar
1	1 ve 12 numaralı tesisler hariç tüm tesisler	2,5,13,16,17,18,24,25,30
2	Tüm tesisler	31,32,33,34,35,36,37,38,39,40
3	Tüm tesisler	31,32,33,34,35,36,37,38,39,40
4	4,9,12,17 numaralı tesisler hariç tüm tesisler	2,7,13,16,17,18,20,25,30,38
5	Tüm tesisler	31,32,33,34,35,36,37,38,39,40
6	Tüm tesisler	31,32,33,34,35,36,37,38,39,40

KAYNAKLAR

- [1] Achillas, 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.
- [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.
- [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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Lieckens, K., & Vandaele, N. (2007). Reverse logistics network design with stochastic lead times. *Computers & Operations Research*, 34(2), 395-416.
- [10] 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).
- [11] Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.
- [12] 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.
- [13] REC (Regional Environment Center-Turkey) 2012. Regulatory Impact Assessment of EU Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive (2002/96/EC).
- [14] REC (Regional Environment Center-Turkey) 2016. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi.
- [15] 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.

- [16] Ye, T., & Zhenhua, Y. (2014). Reverse logistics network: A literature review. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6(7), 1916-1921.
- [17] 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.