İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMANLAR İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK HEDEFLERİNİ DİKKATE ALAN BİR TERSİNE TEDARİK ZİNCİRİ MODELİ

DOKTORA TEZİ

Alperen BAL

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMANLAR İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK HEDEFLERİNİ DİKKATE ALAN BİR TERSİNE TEDARİK ZİNCİRİ MODELİ

DOKTORA TEZİ

Alperen BAL
(507132105)

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şule Itır SATOĞLU

TEMMUZ 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 507132105 numaralı Doktora Öğrencisi Alperen BAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMANLAR İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK HEDEFLERİNİ DİKKATE ALAN BİR TERSİNE TEDARİK ZİNCİRİ MODELİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Şule Itır SATOĞLU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Alp ÜSTÜNDAĞ** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Metin TÜRKAY Koç Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Umut Rıfat TUZKAYA Yıldız Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Emre ÇEVİKCAN İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 20 Haziran 2019
Savunma Tarihi : 17 Temmuz 2019

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında her türlü desteği benden esirgemeyen, tüm lisansüstü eğitimim boyunca her türlü çalışmamda emeği olan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şule Itır SATOĞLU'na teşekkürü bir borç olarak bilmekteyim. Bu çalışmayı yürütürken yaptıkları değerli öneri ve eleştiriler ile çalışmanın ilerlemesine katkıda bulunan tez izleme jürimdeki hocalarım Prof. Dr. Alp ÜSTÜNDAĞ ve Prof. Dr. Metin TÜRKAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezimde geliştirilen modelin uygulamasını yapmamda bana her türlü yardımı sağlayan ve sektördeki tecrübelerini aktaran Fatma Taycı ve ağabeyim makine mühendisi Hüseyin Bal'a müteşekkir olduğumu belirtmek isterim.

Sürdürülebilir tedarik zinciri konusunda yapılan bu tez çalışması, 39770 numaralı İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir. Doktora tez araştırma sürecinde TÜBİTAK BİDEB tarafından 2214-A Yurtdışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı tarafından destek sağlanmış olup, bu kuruluşlara vermiş oldukları destekten ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tez çalışmam süresince verdiği sınırsız destek ve anlayış için değerli eşim Seda Bal'a ve aileme teşekkür ederim.

Temmuz 2019

Alperen BAL
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Sürdürülebilir Tedarik Zinciri 2
1.2 Türkiye'de Tersine Lojistik 6
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **9**
3. YÖNTEM **15**
3.1 Veri Analizi 19
3.1.1 Veri analitiği yaklaşımının atık beyaz eşya verilerine uygulanması 20
3.1.2 Veri analizi sonuçlarının değerlendirilmesi 26
3.2 Çok Amaçlı Modelleme 26
3.2.1 Önerilen optimizasyon modeli 28
3.2.2 Çok amaçlı optimizasyon modelinin çözümü 33
3.2.3 Ödünleşme çizelgesinin elde edilmesi 38
3.3 Veri Zarflama Analizi 38
3.3.1 Veri zarflama analizinin matematiksel modeli 39
4. UYGULAMA **41**
5. MATEMATİKSEL MODEL SONUÇLARI **45**
5.1 Matematiksel Model Sonuçlarının Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi 50
5.1.1 Veri zarflama analizi sonuçları 51
6. SONUÇLAR **55**
KAYNAKLAR **59**
EKLER **69**
ÖZGEÇMİŞ **77**

KISALTMALAR

AEEE	**:** Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman
ANOVA	**:** Analysis of Variance
AUGMECON-2	**:** Augmented Epsilon Constraint Method 2
BA	**:** Bender Ayrıştırması
BÇAO	**:** Bulanık Çok Amaçlı Optimizasyon
CO	**:** Carbon Monoxide
Ç	**:** Çevresel
ÇASO	**:** Çok Amaçlı Stokastik Optimizasyon
DfE	**:** Design for Environment
E	**:** Ekonomik
EEE	**:** Elektrikli ve Elektronik Ekipman
ELR	**:** European Load Response
EoL	**:** End of Life
ESC	**:** European Stationary Cycle
HC	**:** Hydrocarbon
HP	**:** Hedef Programlama
KTDP	**:** Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama
KTDOP	**:** Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama
NOx	**:** Nitrogen Oxide
PM	**:** Particule Matter
PN	**:** Particule Number
REC	**:** Regional Environmental Center
RIA	**:** Regulatory Impact Analysis
S	**:** Sosyal
SE	**:** Stokastik Optimizasyon
SKTDP	**:** Stokastik Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama
TBL	**:** Triple Bottom Line
WHSC	**:** World Harmonized Stationary Testing
6R	**:** Reduce, Reuse, Recycle, Recover, Redesign, Remanufacture

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: EEE üretiminde sıklıkla kullanılan kritik öneme sahip maddeler.....**5**
Çizelge 2.1: Sürdürülebilir tedarik zinciri konusunda incelenmiş makaleler.....**11**
Çizelge 3.1: Geri dönüştürülen ürünlerden elde edilebilecek malzeme miktarının Dolar cinsinden kilogram değeri.....**17**
Çizelge 3.2: Euro 5 ve Euro 6 standartlarına sahip ağır görev dizel motorlar: durağan durum testi.....**18**
Çizelge 3.3: Veri kategorileri.....**21**
Çizelge 3.4: Ürün değişim tarihi ve kampanya zamanı arasında Pearson korelasyon testi.....**22**
Çizelge 3.5: Ürün markaları için ANOVA test sonuçları.....**23**
Çizelge 3.6: Bölgelere ürün alt ve üst segment ürün tercih oranları.....**24**
Çizelge 3.7: Ürün yaşam ömürleri için ANOVA test sonuçları.....**25**
Çizelge 3.8: Bölgelere göre atık olarak toplanmış olan beyaz eşya ürün ömürleri.....**25**
Çizelge 4.1: Uygulama detayları ve parametreler.....**43**
Çizelge 5.1: Optimizasyon modeli çözüm istatistikleri.....**45**
Çizelge 5.2: Ödünleşme çizelgesi.....**45**
Çizelge A.1: AUGMECON-2 ile elde edilen Pareto optimal sonuçlar……..**70**
Çizelge B.1: Veri Zarflama Analizi ile sıralanmış Pareto optimal sonuçlar…..……..**72**
Çizelge C.1: Elektrikli ve elektronik eşya kategorileri …..…….....**74**
Çizelge D.1: Yıllara göre AEEE toplama hedefi .....…..…….....**75**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: 6R yaklaşımı ile kapalı döngü ürün yaşam döngüsü.....**6**
Şekil 3.1: Önerilen karar verme stratejisi.....**16**
Şekil 3.2: Veri analitiğinin dört aşaması.....**20**
Şekil 3.3: Aylık bazda toplanan ömrünü tamamlamış beyaz eşya miktarı..... **23**
Şekil 3.4: Epsilon kısıt yöntemi ile çözüm alanının dilimlere ayrılması.....**36**
Şekil 4.1: Tersine lojistik ağında ürün toplama noktalarından geri dönüşüm tesislerine kadar olan optimizasyon kısmı.....**43**
Şekil 5.1: Toplanmayan ürün adedinin ekonomik hedef üzerine etkisi.....**47**
Şekil 5.2: Çevresel hedefin ekonomik hedef üzerine etkisi.....**47**
Şekil 5.3: Sosyal hedefin ekonomik hedef üzerine etkisi.....**48**
Şekil 5.4: Buzdolabı geri dönüşüm tesisinde her bir periyotta geri dönüştürülen ürün adedindeki ve çalışan sayısındaki değişim.....**49**
Şekil 5.5: Beyaz eşya geri dönüşüm tesisinde her bir periyotta geri dönüştürülen ürün adedindeki ve çalışan sayısındaki değişim.....**49**
Şekil 5.6: 15. Pareto optimal çözüme göre 3. periyotta şehirlerden toplanacak ürün miktarları.....**50**
Şekil 5.7: 1 girdi (yasal hedef) ve 2 çıktı (ekonomik ve sosyal hedefler) için etkinlik sınırı grafiği.....**52**
Şekil 5.8: 1 girdi (yasal hedef) ve 2 çıktı (çevresel ve sosyal hedefler) için etkinlik sınırı grafiği.....**52**
Şekil 5.9: 1 girdi (yasal hedef) ve 2 çıktı (ekonomik ve çevresel hedefler) için etkinlik sınırı grafiği.....**53**

ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMANLAR İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK HEDEFLERİNİ DİKKATE ALAN BİR TERSİNE TEDARİK ZİNCİRİ MODELİ

ÖZET

Küresel iklim değişikliği hakkındaki endişeler ve bu değişikliğin sebep olacağı çevresel, sosyal ve ekonomik sonuçlar düşünüldüğünde tedarik zinciri planlamasında yeni yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Bu yaklaşım stratejik, taktik ve operasyonel seviyede ele alınmalıdır. Yasal düzenlemelerin yürürlüğe konmasıyla birlikte atık elektrikli ve elektronik ekipmanların (AEEE) bertarafı gelişmekte olan ekonomilerde önemli bir konu haline gelmiştir. Bu düzenlemeler ile üreticiler ömrünü tamamlamış ürünleri toplamakla sorumlu tutulmuştur.

Bu çalışmada, ülke çapında toplanan AEEE verileri analiz edilmiş, ömrünü tamamlamış bu ürünlerin servis noktalarından toplanıp, geri dönüşüm tesislerine götürülüp geri dönüştürülmesini kapsayan bir tedarik zinciri modeli önerilmiştir. Veri analizi kısmında, veri analitiği yaklaşımı ile AEEE'lere dair veriler analiz edilmiştir. Üç yıl boyunca toplanan ömrünü tamamlamış beyaz eşya miktarının aylara göre dağılımına bakıldığında toplanan beyaz eşya sayısının mevsimsel olarak ciddi farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Özellikle yılın 3. çeyreğinin sonundan itibaren toplanan ürün sayısında artış olması sebebiyle, bu artışın kampanya dönemi ile ilişkisi araştırılmış ve pozitif korelasyon bulunmuştur. Ülkedeki coğrafi bölgeler dikkate alınarak yeni alınan ürünler için alt segment ya da üst segment ürün tercihlerinde farklılık olup olmadığına bakılmış ve bölgelere göre farklı segmentlerde ürünler tercih edildiği görülmüştür. Aynı şekilde, atık olarak toplanmış beyaz eşyaların ömür verisi incelendiğinde ürün ömürlerinde bölgelere göre farklılıklar olduğu tespit edilmiştir.

Sunulan optimizasyon metodolojisinde üçlü başarım (TBL) ilkesi göz önünde bulundurularak hedef programlama yaklaşımı ile modelleme yapılmıştır. Optimizasyon modelinde ekonomik, sosyal, çevresel hedefler ve ömrünü tamamlamış ürünlerin toplanmasına dair yasal hedefler dikkate alınmıştır. Ekonomik ölçütlerde karlılık parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Maliyet unsurları olarak tedarik zinciri işletme maliyetleri dikkate alınmıştır. Tersine tedarik zinciri modellerinin günümüz koşullarında kar etmesi güç olduğu için ekonomik hedef maliyet ve kazanç unsurları dikkate alındığında başabaş noktasını yakalamak olarak belirlenmiştir. Böylece, başabaş noktasından gerçekleşecek maliyet yönündeki sapmalar minimize edilmiştir. Ömrünü tamamlamış ürünlerin talebindeki değişikliğin fazla olması sebebiyle tesislerdeki işgücünü dengelemek adına yıl boyunca gerçekleşecek ürün talebi beklentisine göre tesisler için her bir periyotta çalışan sayısı hedefi koyulmuştur. Çalışan sayısı hedefinden gerçekleşecek negatif yönlü sapmalar minimize edilmiştir. Çevresel hedeflerin belirlenmesinde üretim ve nakliye operasyonlarından kaynaklanan emisyonlar dikkate alınmıştır. Ürün toplama ve geri dönüştürme sürecinde

oluşabilecek toplam emisyon değeri hedef olarak belirlenmiş ve bu hedeften gerçekleşen sapmalar minimize edilmiştir. Ayrıca, üreticilerin yasal sorumlulukları düşünüldüğünde her bir periyot için yönetmeliklere göre gerekli olan ürün toplama miktarı yasal hedef olarak belirlenmiştir. Bu orandan gerçekleşecek negatif yönlü sapma minimize edilmiştir.

Önerilen hedef programlama modeli gerçek koşulları dikkate alan, çok tesisli, çok ürünlü ve çok periyotlu olarak yapılmış literatürdeki ilk çalışmalardan birisidir. Bu çalışmada geliştirilen tersine tedarik zinciri modelinin uygulaması, ömrünü tamamlamış ürünleri toplamakla yükümlü bir beyaz eşya üreticisinin Türkiye çapındaki ağı için yapılmıştır.

Çok amaçlı modelleme yapılması sebebiyle, literatürde çok amaçlı modeller için etkin bir çözüm algoritması olarak kullanılan AUGMECON-2 tekniği ile modelin çözümü yapılmış ve Pareto optimal çözüm kümesi elde edilmiştir. Her bir çözüm 1 yıllık süreçte her bir periyot (ay) için hangi bölgeden hangi tip ürün toplanması gerektiğini göstermektedir. Toplam 60 adet olurlu Pareto optimal çözüm bulunmuştur. Elde edilen çözümlere bakıldığında ürün talebinde değişkenlikler olmasına rağmen, sosyal hedefin gerektirdiği şekilde işgücü düzeyindeki değişkenlik az olacak şekilde çözümler elde edildiği görülmüştür.

Çok amaçlı optimizasyon modelinin duyarlılığını test etmek amacıyla hedeflerin birbirleri ile ikili olarak karşılaştırması yapılmıştır. Öncelikle, çevresel hedef ve sosyal hedef değerleri sabitlenerek model iki amaçlı olarak çözdürülmüş ve toplanmayan ürün adedinin (yasal hedef) ekonomik hedef (net maliyet) üzerine etkisine bakılmıştır. Ardından, yasal hedef ve sosyal hedef sabitlenerek model iki amaçlı olarak çözdürülmüş ve çevresel hedefin ekonomik hedef (net maliyet) üzerine etkisine bakılmıştır. Son olarak, yasal hedef ve çevresel hedef sabitlenmiş ve model iki amaçlı olarak çözdürülerek sosyal hedefin ekonomik hedef (net maliyet) üzerine etkisine bakılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çok amaçlı optimizasyon modellerinde birden çok çözüm elde edilmesi sebebiyle, bu çözümlerin analiz edilmesi gerekmektedir. Çözümler alanında uzman kişiler tarafından irdelenip, değerlendirmesi yapılabilir. Ayrıca, farklı analitik yöntemler elde edilen çözümlerin değerlendirmesi için kullanılabilir. Bu çalışmada Pareto optimal çözümlerin değerlendirilmesinde karar verme stratejisi olarak Veri Zarflama Analizi (VZA) kullanılmıştır. Her bir Pareto optimal çözüm bir Karar Verme Birimi (KVB) olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca amaç değerleri modelin girdi ve çıktıları varsayılmıştır. Modelde en öncelikli amaç değerinin yasal hedef olması sebebiyle yasal hedef VZA modelinin çıktısı ve diğer üç amaç (ekonomik hedef, sosyal hedef, çevresel hedef) ise girdisi kabul edilmiştir. VZA modelinin çözdürülmesi ile Pareto optimal sonuçlar için verimlilik değerleri elde edilmiştir. Böylece, verimlilik değerlerine göre Pareto optimal çözümlerin sıralaması yapılmıştır. Sosyal hedeften en az sapma gösteren ve diğer hedef değerlerindeki sapmalar da göreceli olarak düşük olan 50 numaralı Pareto optimal çözüm verimli çözüm olarak bulunmuştur.

Sonuçlar, taktik seviyedeki tedarik zinciri faaliyetleri açısından geliştirilen hedef programlama modelinin etkin olduğunu ve bu modelin yöneticilere karar almada yardımcı olabileceğini göstermektedir. Önerilen optimizasyon modeli genel amaçlı olup farklı sektörlerde uygulaması gerçekleştirilebilir. Model üçlü başarım ilkesi (TBL) gözetilerek ekonomik, sosyal ve çevresel hedefleri sağlayacak şekilde oluşturulmuştur. Modelin uygulamasının atık elektrikli ve elektronik ekipmanlar ile ilgili bir sektörde yapılması sebebiyle yönetmeliklerin gerektirdiği yasal toplama

kısıtları da bir hedef olarak modele eklenmiştir. Yasal toplama hedeflerinin olmadığı sektörlerde yapılacak uygulamalar için yasal hedef modelden çıkartılabilir. Ayrıca uygulanan sektördeki ürünlerin yapısı dikkate alınarak ilave çevresel kısıtlar modele dahil edilebilir.

Optimizasyon modeli deterministik olarak çözülmüştür ancak, gerçekte ürün talebinde ve geri dönüştürülen malzemelerin miktarlarında değişkenlikler olabilmektedir. Bu sebeple, gelecek çalışmalarda modelin stokastik olarak çözdürülmesi ve sonuçların buna göre değerlendirilmesi gerçekleştirilebilir.

A REVERSE LOGISTICS MODEL WITH SUSTAINABILITY GOALS FOR WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONICS EQUIPMENT

SUMMARY

Concerns about global warming and potential results of this in regard to economic, environmental and social scales is required new approaches for supply chain planning. This approach must be at the strategic, tactical and operational levels. Especially, with recent legislations the recovery of Waste Electrical and Electronic Equipments (WEEE) become an important matter for developing countries. These legislations enforce companies to collect End of Life (EoL) products.

At the first phase of this study, the WEEE data is analyzied obtained from countrywide collected products. Afterwards, a supply chain model is proposed comprising EoL product collection from service points, delivery of EoL products and recycling of these products. Data analysis phase includes the WEEE data analysis with data analytics approach. The data includes 3 years of collected products. Data pattern shows that the variability at the monthly amount of collected products is quite a high which indicates a seasonality effect. Especially, due to the dramatic increase from the beginning of the 3. period of a year, the relation between campaign time and number of collected products is investigated. One should keep in mind that campaign time starts at the end of summer period of a year and ends with the end of that year. Results of the Pearson correlation analysis showed a positive correlation between the number of collected products each month and the campaign time. When considering geographical regions across the country, it is analyzed whether customers prefer different segments of products. For this purpose, the newly purchased products to replenish with EoL products is splitted in two as higher segment products and lower segment products. The results of the ANOVA analysis showed that different segments of newly purchased products is preferred when the different regions of the country are taken into consideration. In the same manner, another ANOVA test is conducted to check whether the lifespan of the collected EoL product is different regarding the different regions of the country. Results of the test indicated that it is indeed different.

Triple Bottom Line (TBL) accounting is taken into consideration to propose our optimization methodology and goal programming technique is preferred for modelling. Economic, environmental and social targets are considered in the optimization model as well as the targets that the legislations about the EoL product collection. Goal programming technique is preferred because the TBL accounting and the legislations shows targets to companies. Therefore, the deviation from these target should be minimized. Revenue and cost parameters are considered for economic criterion. Supply chain operating expenses are determined as cost parameters. Today, a reverse supply chain can barely make profit. Under this fact, break-even point for the supply chain operations is determined as economic target. Therefore, positive

deviation (cost) from the break-even point is aimed to be minimized. On the other hand, fluctuations at the demand of EoL products is high. This causes different levels of workforce requirement for a recycling facility in the course of a year. In the optimization model, it is aimed to balance number of workers in each period to prevent layoffs due to the demand fluctuations. A target workforce level for each is determined according to the expected average demand. Thus, negative deviation from the workforce level is minimized. Emissions stem from production and logistics operations is taken into consideration to determine environmental target. Total emission value as environmental target is determined for each period that could emanate from EoL product recycling process at the recycling facility and collection process from collection sites. Thus, positive deviation from the emission is minimized. In addition to economic, environmental and social targets, legal requirements are considered as another goal for manufacturers. Legislations state collection targets for each year. Therefore, legal target is determined regarding the collection percentages. Negative deviation from this goal is minimized.

The developed optimization model is multi product, multi facility, multi period one and considers real world conditions. In this respect, it is one of the first study in the literature. The application of the developed optimization model is conducted for the reverse logistics network of a global appliances manufacturer in Turkey.

AUGMECON-2 is an effective and a frequently used solution technique in the literature for multi-objective models. Thus, this method is used for the solution of the proposed optimization model and Pareto optimal solutions are obtained. Each Pareto solution provides the amount of a product, location and period to be collected in the course of a year. Totally, 60 feasible Pareto optimal solution is obtained. These solutions show that the variability at the workforce level in each period is low in spite of the highly variable EoL product demand. This indicates that the model tries to balance workforce level regarding the employment target.

Pairwise comparison of the objectives is done to observe the sensitivity of the model. Initially, environmental and social goals kept constant and the model is run bi-objectively for legal and economic goals. Therefore, the relation between the amount of uncollected product and economic target (net cost) is observed. Afterwards, legal and social goals kept constant and the model is run bi-objectively for economic and environmental goals. Thus, the relation between the total amount of emission and economic target (net cost) is observed. Lastly, legal and environmental goals kept constant and the model is run bi-objectively for economic (net cost) and social goals. Obtained results demonstrated graphically.

Since multi objective optimization models have more than one solution unlike single objective models, an analysis is required for evaluation of the Pareto solutions of these multi objective models. As one solution, the effectiveness of the Pareto solutions can be assessed by experts. Also, different analytic techniques can be used for the assessment. In this study, Data Envelopment Analysis (DEA) is chosen as decision making strategy and used for the evaluation of the Pareto optimal solutions. Each Pareto optimal solution is considered as a Decision Making Unit (DMU). On the other hand, objective values of the optimization model are considered as inputs and outputs of the DEA model. Since the most important objective is the legal target, it is chosen as the output of the DEA model while the other three objectives (economic target, social target and environmental target) are chosen as inputs. After, the DEA model is run and Pareto optimal solutions are ordered according to their efficiency scores. The

50^{th} solution was the efficient one because it had the least deviation from the employment target and relatively small deviations from the other targets.

Results indicate that the proposed goal programming model effective for tactical level supply chain operations planning. This model can also be a good guide for supply cahin managers. In this study, the goal programming model is developed for general purpose and can be implemented different sectors. The model is developed considering TBL accounting where economic, environmental and social objectives determined. The model is applied for WEEE recycling industry and because of that reason, legal collection target is added to the model as another goal. Applications for other sectors can be implemented without the legal collection target. Also, additional environmental constraints can be added if the structure of different types of products is taken into consideration.

The optimization model is solved deterministically however, in real life, demand of product ve the amount of recycled materials varies. Because of that, the model can be solved stochastically in future studies.

1. GİRİŞ

İklim değişikliği ve iklim değişikliğinin çevresel etkileri, sosyal faktörler ve ekonomik kısıtlar tedarik zincirinde yeni bir yaklaşım gerektirmektedir. Bu yaklaşım stratejik, taktik ve operasyonel düzeyde uygulanmalıdır. Günümüzde sadece ekonomik kazanç çerçevesinden bakmak yeterli olmamaktadır. Özel sektör işletmeleri başta olmak üzere temel amaç maliyet minimizasyonu olsa da, çevre faktörünün ve sosyal etkilerin göz önünde bulundurulması oldukça önemlidir. Bu noktada, hükümetler sosyal faydayı artırmak ve arzu edilmeyen çevresel sonuçları azaltmak amacıyla yasal düzenlemeler uygulamaktadırlar.

Sürdürülebilirlik, hem mevcut bir uygulamayı sürdürmek anlamında hem de çevresel bilinci vurgulamak anlamında akademik ve akademik olmayan çevrelerce kullanılmaktadır. Sürdürülebilirlik için her iki tanım da doğru olarak kabul edilebilir ancak ikisi de sürdürülebilirliğin tam tanımı değildir. Sürdürülebilirlik yaklaşımının analizinde üçlü başarım (TBL) yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, bir sistemin sürdürülebilir olabilmesi için ekonomik, çevresel ve sosyal gerekliliklerin asgari düzeyde karşılanması gerektiğini belirtmektedir (Jeruissen, 2000). Linton ve diğerlerinin (2007) belirttiği gibi sürdürülebilir bir tedarik zinciri seviyesine erişebilmek için, tedarik zincirinin her bir aşaması çevre dostu prosedürler içermelidir. Bu aşamalar; tedarikçiler, üreticiler ve müşteriler arasındaki ürün tasarımı, imalat, kullanım ve geri kazanım süreçlerini içermektedir.

Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) geri kazanımı gelişen ülke ekonomilerinde önemli bir pazar haline gelmiştir. Ancak, firmalar bu pazara girmekte ya isteksizdir ya da bu alanda yatırım yapabilecek kabiliyette değillerdir. Öte yandan, üreticiler değişen pazar eğilimleri ve yasal gereklilikler nedeniyle baskı altında bulunmaktadırlar (Kumar ve Putnam, 2008). Ülkemizde, AEEE'lerin üreticiler tarafından geri toplanmasını zorunlu kılan yönetmelik 2012 yılında yürürlüğe alınmıştır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012).

Bu çalışmada; ülke çapında atık haline gelmiş beyaz eşya verilerinin incelenmesi ve analiz edilmesi, üreticilerin yasal sorumlulukları ve üçlü başarım yaklaşımı dikkate

alınarak ömrünü tamamlamış olan beyaz eşyaların toplanması ve geri dönüştürülmesi süreçlerinin optimize edilmesi amaçlanmıştır.

Veri analizi kısmı tezin ilk aşamasını oluşturmakta ve ülke çapında 2014, 2015 ve 2016 yılında bir beyaz eşya üreticisi firma tarafından toplanmış olan AEEE verilerine dair analizleri içermektedir. Yapılan bu analizlerde bölgelere göre ürün tiplerindeki ve ömürlerindeki farklılıklar irdelenmiş ve mevsimsel bazda toplanan ürün miktarlarındaki değişimler analiz edilmiştir. Böylece kullanıcı tercihlerinin anlaşılması amaçlanmıştır. Matematiksel modelleme kısmında ise, atık ürünler her bir ilde servis noktalarından toplanıp, bu ürünlerin geri dönüşüm tesislerine nakliyesi gerçekleştirilecek şekilde modelleme yapılmıştır. Önerdiğimiz metodoloji üçlü başarım (TBL) yaklaşımını dikkate alarak ekonomik, çevresel ve sosyal amaçlar için bir hedef programlama modeli sunmaktadır. Hedef programlama modeli tedarik zinciri taktik seviyesindeki operasyonların planlanması için çok tesisli, çok ürünlü ve çok dönemli olarak geliştirilmiştir.

Tezde önerilen modelleme ile taktik seviyedeki tedarik zinciri operasyonlarının sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirilebilmesi amaçlanmıştır. Bu model, TBL yaklaşımı ile nakliye ve geri kazanım operasyonlarının gerçekleştirilmesi amacıyla daha farklı tersine tedarik zinciri modelleri için kullanılabilir.

1.1 Sürdürülebilir Tedarik Zinciri

Tedarik zincirinde firmaların birçok farklı lokasyonda tesisleri ve tedarikçileri bulunmaktadır. Globalleşme ile başlayarak, firmaların bölgesel tedarikçiler yerine daha rekabetçi olabilen farklı lokasyonlardaki tedarikçileri tercih etmesi ile mesafeler ve tedarik zinciri aşamaları artmıştır. Global ölçekteki firmalar genel olarak büyük firmalar olup, son müşteri tarafından iyi tanınan organizasyonlardır. Dolayısıyla bu firmalar, müşteriler ve tedarik zinciri paydaşları tarafından çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlarda oldukça detaylı değerlendirilmektedir (Seuring & Gold, 2013; Wolf, 2014).

Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi yaklaşımı, tedarik zinciri paydaşlarının kar elde etme amaçlarının yanında, üretim ve tedarik operasyonlarının ekolojik ve sosyal sisteme etkilerini de dikkate aldığı bir yaklaşımdır (Pagel & Shevchenko, 2014). Seuring ve Muller (2008) sürdürülebilir tedarik zincirini şu şekilde tanımlamaktadır:

“Tedarik zincirinde olan firmalar boyunca işbirliği yapılarak malzeme, bilgi ve sermaye akışının yönetildiği ve bu işbirliği yapılırken müşteri ile tedarik zinciri paydaşlarından kaynaklanan sürdürülebilir gelişmenin üç ayağının (çevresel, sosyal ve ekonomik) dikkate alındığı yönetimdir.”

Sürdürülebilirlik, çevresel ve sosyal duyarlılık gerektiren uygulamaları gerektirmektedir. Çevresel uygulamalar; kirlilik kontrolü ve önlenmesi için yapılan yatırımları, çevre yönetim sistemlerinin ve ISO 14001 gibi çevre yönetim sertifikalarının uygulanmasını kapsamaktadır (Awaysheh & Delmas, 2010; Delmas & Montiel, 2009). Sosyal sorumluluk uygulamaları ise, bölgesel manada çalışan yasaları ile uyumlu olmayı ve ISO 26000 gibi sosyal standartların benimsenmesini kapsamaktadır (Castka & Balzarova, 2008).

Performans genel olarak bir işe dair başarılı çıktı olarak tanımlanır. Çevresel performans kaynak kullanım verimliliğini, geri dönüşümü ve kirliliğin azaltılmasını, atık ve emisyonları göstermektedir (Rao & Holt, 2005). Sosyal performans ise insan haklarını, iş uygulamalarını ve yapılan işlerin topluma olan etkilerini göstermektedir (Yawar & Seuring, 2015). Ekonomik performans ise operasyonel ya da muhasebeye dayalı ölçütleri göstermektedir (Golicic & Smith, 2013).

Tedarik zincirinin temel operasyonunun üretim olduğu düşünüldüğünde sürdürülebilirlik yaklaşımının ürün, süreç ve sistem seviyesinde uygulanması 6R yöntemi ile Jayal ve diğ. (2010) tarafından önerilmiştir. Buna göre, ürünlerin yaşam döngüsü boyunca uygulanması gereken 6R aşamaları şu şekildedir:

- İndirgeme (Reduce): Ürün yaşam döngüsünde imalat öncesi kullanılan kaynakların azaltılmasını, imalat sürecinde kullanılan enerji ve malzeme miktarının azaltılmasını ve ürün kullanım sürecinde atık miktarının azaltılmasını ifade etmektedir.

- Yeniden kullanım (Reuse): Ürün veya ürün bileşenlerinin birinci yaşam döngüsünden sonra yeni ürünlerde tekrar kullanılmasını ve böylece ham madde kullanımının azaltılmasını ifade etmektedir.

- Geri dönüşüm (Recycle): Yeni ürünler veya malzemeler için atık niteliği taşıyan, ömrünü tamamlamış ürünlerden gelen malzemelerin dönüştürülmesi işlemini ifade etmektedir.

- Toplama ve değerlendirme (Recover): Kullanım aşamasından sonra ürünlerin toplanıp, ayrıştırılmasını, sökülmesini ve sonraki yaşam döngüleri için temizlenmesini ifade eden süreçtir.

- Yeniden tasarım (Redesign): Ürünün sonraki yaşam döngülerinde tekrar kullanılabilmesi için Çevre için Tasarım (DfE) gibi yaklaşımların dikkate alınarak ürün tasarımının gerçekleştirilmesidir. Böylece ürünün kullanım sonrası orijinal haline geri getirilmesi, yeni gibi olması ya da üründen mümkün olduğunca fazla malzeme ve bileşenin kullanılabilmesi amaçlanmaktadır.

- Yeniden üretim (Remanufacture): Kullanılmış olan ürünlerin yeniden işlenmesi ve böylece orijinal haline getirilmesi ya da yeni gibi yapılması işlemidir.

Şekil 1.1 kapalı döngü bir sistemde; malzemelerin çıkarılması, malzemelerin işlenmesi, imalat, kullanım, ürünün piyasadan çekilmesi, yeniden değerlendirme ve imha etme süreçlerinin 6R (Jayal ve diğ., 2010) ile ilişkisini göstermektedir.

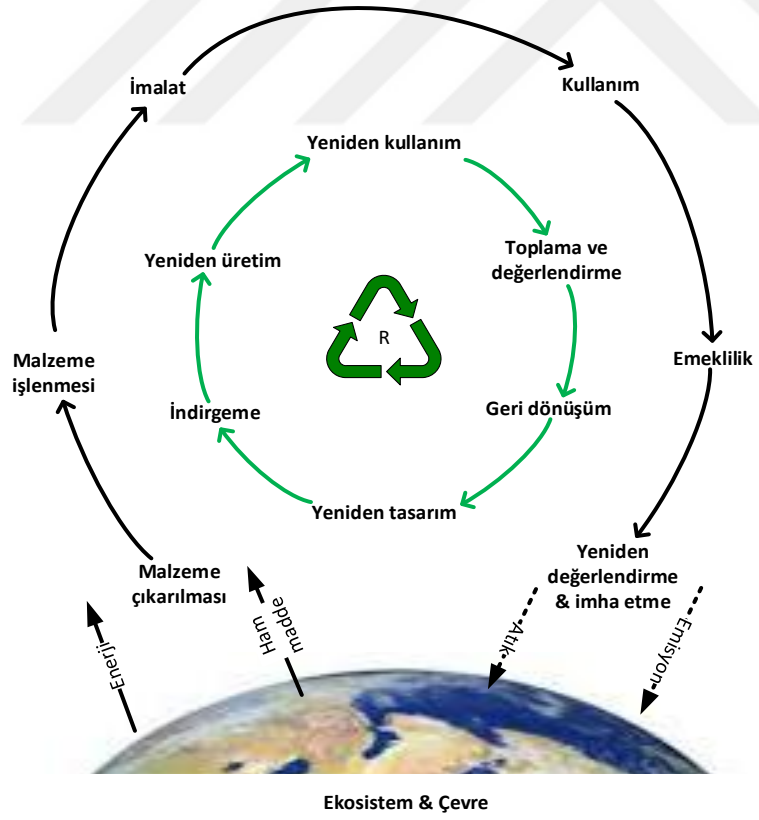
Ürünün tasarım sürecinden başlanarak, kullanım ömrünü tamamlandıktan sonra yenileyici çalışmaların ürün, bileşen ve malzeme düzeyinde yapılması ile optimize bir döngü oluşturulması Döngüsel Ekonomi olarak tanımlanabilir. Günümüzde, doğrusal akışa sahip olan iş modellerine alternatif olarak öne sürülmektedir (Parajuly ve Wenzel, 2017). Ömrünü tamamlamış ürünlerin yeniden üretim veya geri dönüşüm ile döngüsel olarak yeniden üretime sokulması, doğadan çıkarılması gereken ham madde ihtiyacını azaltmaktadır. Elektrikli ve Elektronik Ekipman üretiminde kritik öneme sahip olan ve doğada nadir bulunan İndiyum, Berilyum, Paladyum, Samaryum, Neodimiyum gibi çeşitli elementler bulunmaktadır. Sürdürülebilir bir gezegen için bu elementlerin üretimde döngüsel olarak kullanılması oldukça önemlidir. Çizelge 1'de elektrikli ve elektronik ekipmanlarda kullanılan kritik ham maddeler gösterilmiştir.

Çizelge 1.1: EEE üretiminde sıklıkla kullanılan kritik öneme sahip maddeler (Öko Institut e.V., 2012'den derlenmiş).

AEEE	Bileşen	İndiyum	Paladyum	Nadir toprak elementleri	Galyum	Kobalt	Platin
Akıllı telefon	Baskılı devre		×				
	Batarya (Li-ion)					×	
	Hoparlör			×			
Dizüstü bilgisayar	Baskılı devre		×				
	Batarya (Li-ion)					×	
	Hoparlör			×			
	Sabit disk						×
	Ekran	×		×	×		
Masaüstü ve dizüstü bilgisayar	Baskılı devre		×				
	Batarya (Li-ion)					×	
	Ekran	×		×	×		
Televizyon	Baskılı devre		×				
	Ekran	×		×	×		

1.2 Türkiye'de Tersine Lojistik

Türkiye'de AEEE geri kazanımına dair yasal çalışmalar Avrupa Birliği Komisyonu tarafından uygulamalar gözetilerek ve yayınlanan AEEE yönetmeliği (EC., 2002) dikkate alınarak Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından başlatılmıştır. İlk olarak, 'Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılmasına Dair Yönetmelik' (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2008) 30.05.2009 tarihli 26891 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanmıştır. Bu yönetmeliğin amacı; çevre ve insan sağlığının korunması amacıyla; elektrikli ve elektronik eşyalarda bazı zararlı maddelerin kullanımının sınırlandırılması, bu sınırlandırmalardan muaf tutulacak uygulamaların belirlenmesi, elektrikli ve elektronik eşyaların ithalatının kontrol altına alınmasına dair idari, hukuki ve teknik esasları düzenleyerek elektrikli ve elektronik eşya atıklarının çevreyle uyumlu şekilde geri kazanılması ve bertaraf edilmesine ilişkin usul ve esasları düzenlemek olarak belirlenmiş ve EK C'de verilen 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 10 nolu sınıflara dahil olan elektrikli ve elektronik eşyalar ile elektrik ampulleri ve evsel amaçlı kullanılan aydınlatma gereçleri kapsam dahilinde tutulmuştur (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2008).



Şekil 1.1: 6R yaklaşımı ile kapalı döngü ürün yaşam döngüsü (Jayal ve diğ., 2010).

Ardından, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 'Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği' 22 Mayıs 2012 tarihinde 28300 sayılı Resmi Gazete'de

çıkan yazı ile yürürlüğe konmuştur (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012). Bu yönetmeliğin amacı; elektrikli ve elektronik eşyaların üretiminden nihai bertarafına kadar çevre ve insan sağlığının korunması amacıyla elektrikli ve elektronik eşyalarda bazı zararlı maddelerin kullanımının sınırlandırılması, bu sınırlandırmalardan muaf tutulacak uygulamaların belirlenmesi ve elektronik atıkların oluşumunun ve bertaraf edilecek atık miktarının azaltılması için yeniden kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım yöntem ve hedeflerine ilişkin hukuki ve teknik esasları düzenlemek olarak belirtilmiştir. Bu yönetmelik ile yeniden kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım faaliyetlerinde Bakanlığın, Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüklerinin, belediyelerin, elektrikli ve elektronik ekipman (EEE) üreticilerinin, EEE dağıtıcılarının, tüketicilerin, AEEE işleme tesislerinin görev ve yükümlülükleri belirlenmiştir.

'Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği'nin uygulaması esnasında karşılaşılan sorunlar dikkate alınarak ve bu yönetmeliğin Avrupa Birliği'nin 2012/19/EC (EC., 2012) sayılı Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya Direktifine yakınlaştırılması amacı ile 'Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik' (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015) Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından hazırlanmış ve görüşe açılmıştır. Bu yönetmelikte, üreticiler için kategori bazında 2016 yılından 2030 yılına kadar olacak şekilde yüzdesel bazda AEEE toplama hedefleri belirlenmiştir (bkz. Ek D).

Ülkemizde, mevcut AEEE durumunu ve bu ürünlerin etkilerini araştırmak amacıyla Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından Bölgesel Çevre Merkezi (REC) adlı kuruluşa Düzenleyici Etki Analizi (RIA) yaptırılmıştır (REC Türkiye, 2011).

RIA raporuna göre, Türkiye'de 2010 yılında 539.000 ton AEEE bulunmaktadır ve 2020 yılında her yıl ortalama %5 artışla bu miktarın 894.000 ton olması beklenmektedir. AEEE miktarındaki bu artışın yanında, Türkiye'de kişi başına düşen 0,27 kg olan AEEE toplama miktarının 2020 yılı itibari ile 4,87 kilograma çıkarılması hedeflenmektedir (REC Türkiye, 2011). Bu artış oranları dikkate alındığında, hedeflerin yakalanabilmesi amacıyla Türkiye'de etkin bir AEEE geri dönüşüm sisteminin kurulması gerekmektedir.

Ancak, Türkiye'de Elektrikli ve Elektronik atıkların dönüştürülmesinde çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir (Kılıç ve diğ., 2015):

- Avrupa ülkelerine kıyasla Türkiye'de daha az miktarda AEEE bulunmaktadır.

- Ülkedeki bölgelere göre AEEE miktarları değişkenlik göstermektedir.
- Ülkede AEEE toplama altyapısı henüz tam anlamıyla oluşturulmamıştır.
- Soğutma ve iklimlendirme ekipmanları için uygun geri dönüşüm tesisleri yeterli sayıda değildir.
- AEEE geri dönüşüm endüstrisi resmi olmayan hurdacılar tarafından domine edilmiştir.
- AEEE toplanması ve rehabilitesi için farkındalık oluşmamıştır.
- AEEE geri dönüşümüne dair teknik ve finansal boyutlarda yeterli bilgi birikimi bulunmamaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sürdürülebilir tedarik zinciri literatürde yoğun bir şekilde çalışılmıştır. TBL ile ilişkili olarak çeşitli sürdürülebilirlik göstergeleri tedarik zincirinde yönetsel (Carter ve Rogers, 2008) ve operasyonel (Drake ve Spinler, 2013; Kleindorfer ve diğ. 2005) kararlar vermekte kullanılmaktadır. Tedarik zincirinin sosyal boyutunun literatürde ihmal edildiği, yoğun bir şekilde çalışılmış çevresel boyut ve özellikle ekonomik boyut dikkate alındığında söylenebilir. Yura (1994) tedarik zincirindeki sosyal yönleri açıklamıştır, Brent ve diğ. (2007) ve Abreu ve Camarinha-Mathos (2008) sosyo-ekonomik konuları çalışmışlardır. Clift (2003) sosyo-çevresel konuları detaylandırmıştır. Paksoy ve diğ. (2010) bir kapalı döngü tedarik zinciri için çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önermiştir. Model tedarik zinciri maliyetini ve sera gazı salınımını minimize etmektedir. Tseng ve Hung (2014) bir kıyafet tedarik zinciri için operasyonel maliyetler ve karbondioksit emisyonundan kaynaklanan sosyal maliyetleri dikkate alarak çok amaçlı optimizasyon modeli önermiştir. Kapalı döngü ve tersine tedarik zinciri modellerinin nakliye süreçleri planlanması ise taktiksel seviyede değerlendirilmiş ve matematiksel optimizasyon modelleri önerilmiştir (Dekker ve diğ. 2013).

Literatürde, çok tesisli ve çok ürünlü deterministik tesis yeri seçimi problemi de oldukça yoğun bir şekilde çalışılmıştır. Ancak, tedarik zinciri operasyonlarının planlanması daha az ilgi çekmiştir. Öte yandan, sürdürülebilirlik yaklaşımı çok amaçlı bir çalışma gerektirmektedir. Gonela ve diğ. (2015) bir biyoetanol tedarik zinciri için stokastik karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önermiştir. Sonuçları ise farklı sürdürülebilirlik seçenekleri altında değerlendirmiştir. Krumwiede ve Sheu (2002) bir üçüncü parti lojistik sağlayıcısı için tersine tedarik zinciri modeli geliştirmiştir. Hung Lau ve Wang (2009) gelişmiş ülkelerin durumunu dikkate alarak, elektronik sektöründe mevcut tersine tedarik zinciri teorilerinin ve modellerinin olurluğunu araştırmıştır. Bir tersine tedarik zinciri ağ tasarımı için geri dönüşümden elde edilen malzemelerin gelirini dikkate alan karma tamsayılı programlama modeli Shih (2001) tarafından önerilmiştir. Kara ve diğ. (2007) kesikli olay simülasyonunu kullanarak bir tersine tedarik zinciri modelinde atık beyaz eşyaların toplama maliyetini

hesaplamıştır. Mutha ve Pokharel (2009) çok seviyeli bir ağ tasarımı modeli geliştirmiştir. Geri kazanım tesisine gönderilmek için toplanan ürünler öncelikle bir konsolidasyon merkezinde toplanmakta ve burada geri kazanım tesisine gönderilmek üzere ayrıştırılmaktadır. Tuzkaya ve diğ. (2011) bir tersine tedarik ağı tasarımı için iki seviyeli çok amaçlı bir optimizasyon modeli önermiştir ve bu modeli Türkiye beyaz eşya endüstrisinde uygulamıştır.

Bal ve Satoğlu (2017) bir global beyaz eşya üreticisinin tersine tedarik zinciri operasyonlarını planlamak için optimizasyon modeli önermiştir. Bu modelde sürdürülebilirlik yaklaşımı kullanılmış ve ömrünü tamamlamış ürünleri yasal olarak toplama gerekliliği dikkate alınmıştır. Kapukaya ve diğ. (2019) bir elektrikli ve elektronik ekipman geri kazanım firması için geri dönüşüm operasyonlarından kaynaklanan maliyetleri ve lojistik faaliyetlerden kaynaklanan maliyetleri minimize edecek iki amaçlı optimizasyon modeli önermiştir. Bu çalışmada sosyal kısıtlar dikkate alınarak çok ürünlü ve çok periyotlu olacak şekilde tedarik zinciri operasyonlarının planlaması yapılmıştır. Coşkun ve diğ. (2016) üç farklı müşteri segmentini düşünerek hedef programlama yaklaşımı ile bir yeşil tedarik zinciri tasarımı önermiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çevre duyarlılığı olan yeşil müşterilerin sayısı arttıkça, perakendecilerin tedarikçilerle olan işbirliği müşterilerin beklentilerini karşılayabilmek adına tedarik zincirini yeniden tasarlamak için artmaktadır. Benzer bir çalışma Ghosh ve Shah (2015) tarafından yapılmıştır. Yazarların elde ettiği sonuçlar doğrulamıştır ki çevreye duyarlı tüketicilerin olduğu pazarda tedarik zinciri paydaşları yeşil girişim ve inovasyonlarda bulunmak için daha iyi fırsatlar elde etmektedirler.

Çizelge 1.1'de makale özet tablosu sunulmuştur ve makaleler ekonomik (E), çevresel (Ç) ve sosyal (S) amaçlara göre özetlenmiştir. Ekonomik amaçlar tüm makalelerde bulunmaktadır. Onaltı makalede sadece ekonomik amaç kullanılmıştır. Hem ekomonik hem de çevresel amaçlar Sarkar ve diğ. (2017), Yu ve Solvang (2017), Pati ve diğ. (2008), Amin ve Zhang (2013), Diabat ve diğ. (2013), Ramudhin ve diğ. (2010) tarafından kullanılmıştır. Ancak bu çalışmalarda herhangi bir sosyal amaç bulunmamaktadır. Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalarda (Anvari ve Turkay (2017), Arampantzi ve Minis (2017), Feito-Cespon ve diğ. (2017), Govindan ve diğ. (2016a), Govindan ve diğ. (2016b)) ekonomik ve çevresel amaçlara ek olarak sosyal amaçlar da kullanılmaktadır. Birçok makale ekonomik amaçlar içermesine rağmen,

sürdürülebilirlik yaklaşımı literatürde yaygın şekilde çalışılmamıştır. Çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı son yıllarda artarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmalara ilaveten, sürdürülebilir tedarik zinciri literatüründeki sadece sınırlı sayıda makalede (Arampantzi ve Minis (2017), Ramudhin ve diğ. (2010), Pati ve diğ. (2008)) hedef programlama yaklaşımı kullanılmıştır. Arampantzi ve Minis (2017) sadece ileri lojistik ağ tasarımını dikkate almıştır. Özellikle tesis yeri planlamasına ve kapasite artırımına karar verilmiştir. Anvari ve Türkay (2017) da tesis yeri planlama problemini çalışmıştır. Bu çalışmada TBL yaklaşımı ile çok çeşitli çevresel ve sosyal hedef, ekonomik hedefin yanında dikkate alınmıştır.

Colapinho ve diğ. (2015) hedef programlama modellerinin kapsamlı bir değerlendirme makalesini sunmuştur. Hedef programlama tekniği, mühendislik tasarımı, yönetim ve sosyal bilimler alanında birçok çok kriterli karar verme probleminde kullanılmıştır. Hibrit imalat sistemlerinin tasarlanması (Satoğlu ve Suresh, 2009), kağıt geri dönüşüm ağının kurulması (Pati ve diğ. 2008), piller için kapalı döngü tedarik zinciri tasarımı (Subulan ve diğ. 2015a), lastikler için kapalı döngü tedarik zinciri tasarımı (Subulan ve diğ. 2015b) için hedef programlama veya bulanık hedef programlama yöntemleri kullanılmıştır.

Çizelge 2.1: Sürdürülebilir tedarik zinciri konusunda incelenmiş makaleler (Bal ve Satoğlu, 2018).

Yayın	Ağ türü	Amaç	Modelleme yaklaşımı	Vaka çalışması
Anvari & Türkay, 2017	İleri	EÇS	KTDP	Evet
Arampantzi & Minis, 2017	İleri	EÇS	HP	Evet
Feitó-Cespón ve diğ., 2017	Tersine	EÇS	ÇASO	Evet
Safaei ve diğ., 2017	Kapalı döngü	E	KTDP	Evet
Sarkar ve diğ., 2017	Kapalı döngü	EÇ	KTDOP	Hayır
Yu & Solvang, 2017	Tersine	EÇ	ÇASO	Hayır
Demirel ve diğ., 2016	Tersine	E	KTDP	Evet
Govindan ve diğ., 2016a	Kapalı döngü	EÇS	KTDP	Evet

Çizelge 2.1 (devam): Sürdürülebilir tedarik zinciri konusunda incelenmiş makaleler (Bal ve Satoğlu, 2018).

Govindan ve diğ., 2016b	Tersine	EÇS	BÇAO	Evet
Shaw ve diğ., 2016	Kapalı döngü	Ç	BA	Hayır
Ene & Öztürk, 2015	Tersine	E	KTDP	Hayır
Zhou & Zhou, 2015	Tersine	E	KTDOP	Evet
Hashemi ve diğ., 2014	Kapalı döngü	E	KTDP	Hayır
Özceylan ve diğ., 2014	Kapalı döngü	E	KTDOP	Hayır
Roghanian & Pazhoheshfar, 2014	Tersine	E	KTDP	Hayır
Soleimani & Govindan, 2014	Tersine	E	SO	Hayır
Amin & Zhang, 2013	Kapalı döngü	EÇ	ÇASO	Hayır
Diabat ve diğ., 2013	Kapalı döngü	EÇ	KTDP	Hayır
Özceylan & Paksoy, 2013	Kapalı döngü	E	KTDP	Hayır
Ramezani ve diğ., 2013	Kapalı döngü	E	ÇASO	Hayır
Alumur ve diğ., 2012	Tersine	E	KTDP	Evet
Das & Chowdhury, 2012	Tersine	E	KTDP	Hayır
Kannan ve diğ., 2012	Tersine	Ç	KTDP	Evet
Özkır & Başlıgil, 2012	Kapalı döngü	E	KTDP	Hayır
Fonseca ve diğ., 2010	Tersine	ES	ÇASO	Evet
Ramudhin ve diğ., 2010	İleri	EÇ	HP	Hayır
Lee & Dong, 2009	Tersine	E	SKTDP	Hayır
Aras & Aksen, 2008	Tersine	E	KTDOP	Hayır
Demirel & Gökçen, 2008	Kapalı döngü	E	KTDP	Hayır
Pati ve diğ., 2008	Tersine	EÇ	HP	Evet

(Kısaltmalar - BA: bender ayrıştırması, Ç: çevresel, E: ekonomik, BÇAO: bulanık çok amaçlı optimizasyon, HP: hedef programlama, KTDP: karma tamsayılı doğrusal programlama, KTDOP: karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama, ÇASO: çok amaçlı stokastik optimizasyon, S: sosyal, SKTDP: stokastik karma tamsayılı doğrusal programlama, SO: stokastik optimizasyon)

Literatürde çeşitli çalışmalarda çok amaçlı karar verme problemleri ile VZA beraber kullanılmıştır (Bouyssou, 1999; Kashavarz & Toloo, 2015; Belton & Vickers, 2015). Yousefi ve diğ. (2017) hedef programlama ve VZA yöntemini hibrit kullanarak tedarik zinciri ağ modellemesi yapmıştır. VZA ve tamsayılı çok amaçlı doğrusal programlama arasındaki ilişkiyi irdelemek amacıyla çalışmalar yapılmıştır (Liu ve diğ. 2000; Yougbare ve diğ. 2007). Araştırmacılar VZA'yı tedarik zinciri kararlarını vermek için de kullanmışlardır. Gupta ve diğ. (2018) tedarik zincirinde oldukça kritik olarak kabul edilen nakliye ağı için farklı rotalardaki araçların verimliliklerini ölçmek amacıyla VZA tekniğini kullanmışlardır.

Tedarik zinciri operasyonlarında büyük veri analizi oldukça önemlidir. Büyük veri hem araştırmacılar tarafından var olan teorileri test etmek amacıyla ve hem de endüstride daha iyi kararlar alabilmek amacıyla kullanılmaktadır (Muhtaroglu et al. 2013). Lojistik ağında büyük veri, tedarik noktalarında, talep noktalarında ve nakliye operasyonlarında oluşmaktadır. Bu veri tedarikçilerin tedarik kapasitelerinin hesaplanmasında, talepin tahmin edilmesinde ve nakliye maliyetlerinin hesaplanmısda kullanılmaktadır (Najafi ve diğ. 2013). Mevcut durumda, işletmelerin ancak %20'sinin veri analitiği yaklaşımını ve büyük veriyi tedarik zinciri kararlarında kullandığı değerlendirilmektedir (Ankit ve diğ. 2017). Tedarik zinciri yönetimi ve lojistik alanında büyük veri analitiğine dair yapılan uygulama ve çalışmalar Wang ve diğ. (2016) tarafından değerlendirilmiştir.

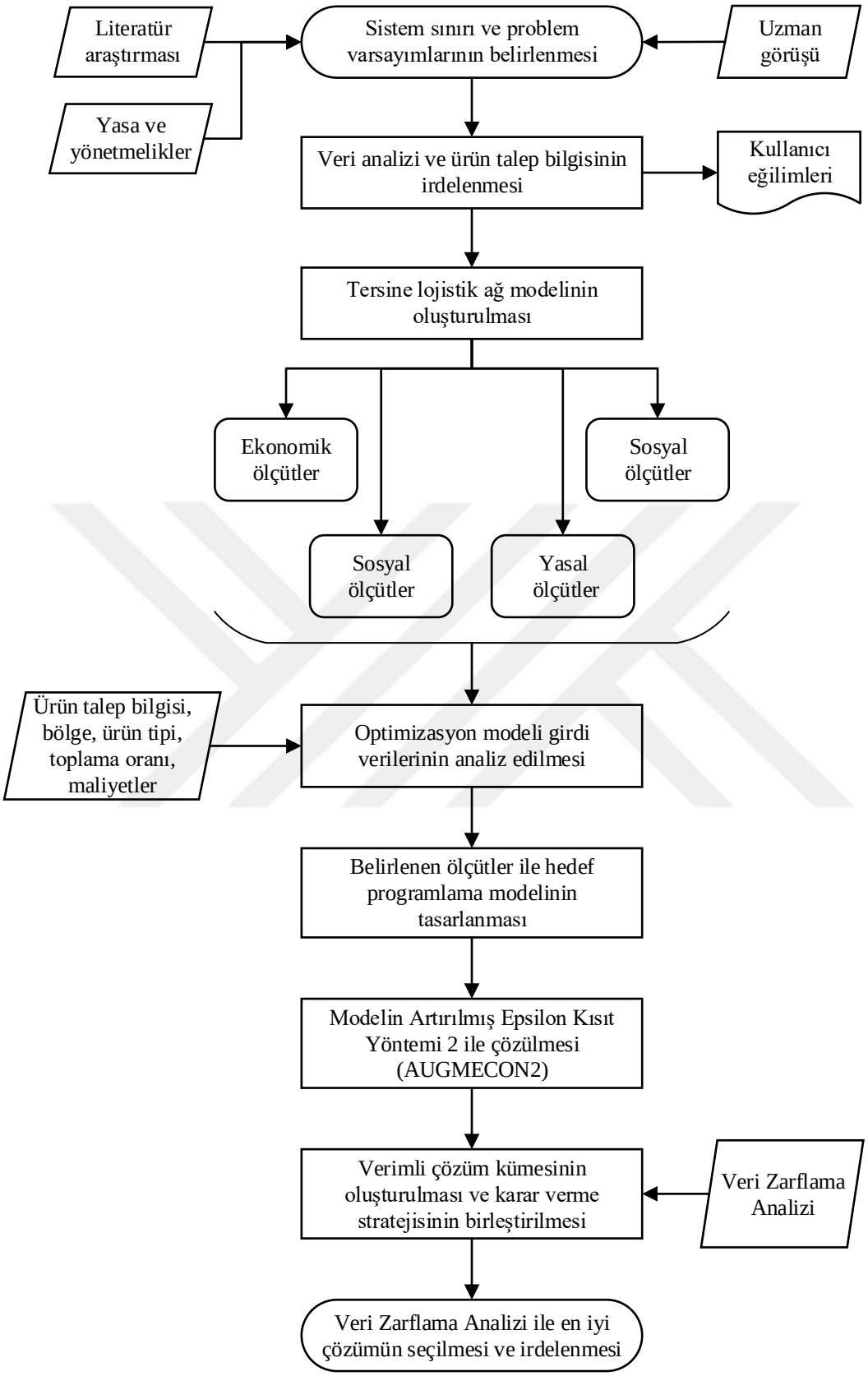
Yapılan kapsamlı literatür araştırmaları neticesinde, stratejik planlama düzeyinde değerlendirilen tesis açma ve yerleştirme probleminin yoğun bir şekilde çalışıldığı görülmüştür. Özellikle son yıllardaki çalışmalarda ekonomik, çevresel ve sosyal faktörlerin de önerilen modellerde dikkate alındığı gözlenmiştir (Anvari ve Türkay, 2017; Arampantzi ve Minis, 2017; Feitó-Cespón ve diğ., 2017). Tedarik zinciri süreçlerinin planlanmasında taktik seviyede değerlendirilebilecek tersine lojistik ve operasyon planlaması probleminin ise literatürde çok çalışılmadığı görülmüştür. Ayrıca TBL yaklaşımında üçlü başarım kriterlerinin hedeflere dayalı olarak ölçülmesi gerekmektedir. Ancak, çok az sayıdaki çalışmada (Arampantzi ve Minis, 2017; Ramudhin ve diğ., 2010; Pati ve diğ., 2008) hedef programlama yaklaşımı kullanılarak modelleme yapıldığı gözlenmiştir. Bu kapsamda, önerilen hedef programlama modeli TBL yaklaşımı ile tersine lojistik ve operasyon planlaması yapan ve bunun

uygulamasını atık beyaz eşya geri dönüşüm endüstrisinde gerçekleştiren ilk çalışmadır. Yapılan literatür araştırması bu bulguyu desteklemektedir.

3. YÖNTEM

Sürdürülebilir tedarik zinciri modellemesi yapabilmek için öncelikle sistem sınırlarının belirlenmesi ve toplanan verilerin analiz edilmesi gerekmektedir. Şekil 3.1 önerilen karar verme metodolojisini göstermektedir. Bu strateji herhangi bir tedarik zincirinde operasyonların planlanması amacıyla kullanılabilir. Tez kapsamındaki vaka çalışması düşünüldüğünde, ilgili literatür dikkate alınarak ve tersine tedarik zinciri konusunda çalışan uzman görüşleri neticesinde, operasyonel planlama probleminin sistem sınırlarının tanımlanmalıdır. Ayrıca, sistem varsayımlarının ortaya konması gerekmektedir. Önerilen tedarik zinciri ağında, müşteriler, atık beyaz eşya toplama alanları, geri dönüşüm tesisleri, ham madde pazarları ve devlet (ilgili hükümet organları) dikkate alınmaktadır. Çalışmanın çerçevesi ekonomik, çevresel ve sosyal faktörlerin dikkate alınması ile tamamlanmıştır. Çalışmada, Pareto sonuçlar kümesinde birbiri ile çelişen amaçlar bulunduğu için Veri Zarflama Analizi kullanılarak bir karar verme stratejisi uygulanmıştır.

Sürdürülebilirlik konusunu çalışmanın zorluklarından bir tanesi, mevcut olan faktörler arasındaki çakışma ve uyulmazlıklıktır. Firmaların karlılıklarını koruması onların ayakta kalabilmesi için kesinlikle gereklidir ancak doğaya ve topluma karşı olan sorumluluk da göz ardı edilemez. Doğaya yani çevreye karşı olan sorumluluğu yerine getirmek için rehber niteliğinde bazı standartlar (bkz. ISO 14001) bulunmaktadır. Aynı zamanda bu standartlar firmaları çevreye karşı olan sorumluluklarını yerine getirmeye zorlamaktadır. Tedarik zincirinin toplam performansı düşünülünce ise sadece ekonomik ve çevresel performans parametreleri yeterli olmamakta, aynı zamanda sosyal faktörlerin de göz önüne alınması gerekmektedir (Ramudhin ve diğ. 2010). Lakin, sosyal perspektif henüz çok çalışılmamış bir alan olarak durmaktadır (Seuring ve Muller, 2008).



Şekil 3.1: Önerilen karar verme metodolojisi.

Ekonomik ölçütler: Yatırımcılar için en önemli unsur yapılan yatırımın karlılığıdır. Bu sebeple, ekonomik parametrelerin seçiminde ekonomik ölçütlerdeki karlılık parametreleri dikkate alınmıştır. Maliyet olarak tersine tedarik zinciri işletme maliyetleri dikkate alınmıştır ancak ilk yatırım maliyeti hesaba katılmamıştır. Maliyet kalemleri atık ürünleri geri dönüştürme maliyetini, işçilik maliyetini, nakliye maliyetini ve toplanmayan ürünler için ceza maliyetini içermektedir. Bunun yanında çizelge 3.1'den görülebileceği gibi, kazanç unsuru geri dönüştürülen atık beyaz eşyalardan elde edilen alüminyum bakır gibi malzemelerin parasal değeri olarak hesaba katılmıştır.

Çizelge 3.1: Geri dönüştürülen ürünlerden elde edilebilecek malzeme miktarının Dolar cinsinden kilogram değeri (Shih, 2001).

	Bakır	Demir	Aluminyum	Pelet	Motor	Cam	CFC
Buzdolabı	4.5	0.25	2	0.1	0.4	0.012	2
Bulaşık makinesi	4.5	0.25	2	0.1	0	0.012	2
Çamaşır makinesi	4.5	0.25	2	0.1	0.4	0.012	2

Çevresel ölçütler: Modelde kullanılan emisyon ve geri dönüşüm oranları tanınmış veri kaynaklarından (www.myclimate.org, footprint.wwf.org.uk, www.nature.org), araştırma makalelerinden (Eskandarpour ve diğ. 2015, Neumüller ve diğ. 2015) ve raporlardan (Trends in Global CO_2 emissions: 2016, Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2015) elde edilmiştir. Ayrıca kamyonlar için performans ölçütleri Volvo (Martersson, 2010) gibi üreticilerin sağladığı kaynaklardan elde edilmiştir. Martersson (2010) hesaplama yöntemini dikkate alarak kamyonlar için karbondioksit emisyonu değerleri hesaplanmıştır. Buna göre, yük kapasitesi 27 ton olan 40 tonluk bir kamyonun yakıt tüketimi 0.35 litre/km'dir. Hesap aşağıda belirtildiği şekilde yapılmıştır:

0,35 litre/km × (2,7 kg/litre × 27 ton) ≈ 0,035 kg/ton-km.

Önerilen model sadece nakliye operasyonlarından kaynaklanan emisyonu değil, aynı zamanda geri dönüşüm tesisindeki üretim süreçlerinden kaynaklanan emisyonları da dikkate almaktadır. Çünkü bir tesis harcamış olduğu enerjiden, personelin nakliyesinden, kağıt tüketiminden, bilgisayar kullanımından ve bunun gibi benzer nedenlerden ötürü karbondioksit emisyonu oluşturmaktadır.

Çizelge 3.2'de Euro 5 ve Euro 6 emisyon standartlarına sahip olan ağır görev motorları için emisyon değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır.

Çizelge 3.2: Euro 5 ve Euro 6 standartlarına sahip ağır görev dizel motorlar: durağan durum testi.

	Test	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NOx (g/kWh)	PM (g/kWh)	PN (1/kWh)
Euro VI	WHSC	1.5	0.13	0.40	0.01	8.0×10^{11}
Euro V	ESC&ELR	1.5	0.46	2.0	0.02	-

PM = 0.13 g/kWh motorlar için < 0.75 dm3 silindir başına süpürme hacmi ve nominal güç değeri > 3000 min^{-1}

(Semboller – CO: karbon monoksit, ELR: Avrupa yük döngüsü (European load response), ESC: Avrupa durağan döngüsü (European stationary cycle), HC: hidrokarbon, NOx: nitrojen oksit, PM: parçacıklı madde, PN: parçacık sayısı, WHSC: Dünya harmonize durağan durum testi (world harmonized stationary testing))

Sosyal ölçütler: Sosyal sorumluluk yönetimi standardı ISO 26000 (ISO, 2010) sosyal ölçütlerin değerlendirilmesi için iyi bir kaynaktır. ISO 26000 sosyal sorumluluk çerçevesini 7 ana başlık altında birleştirmektedir: organizasyonel yönetim, insan hakları, çalışma usulleri, çevre, adil çalışma yöntemleri, tüketici konuları, toplumun katılımı ve gelişme. Ayrıca, Anvari ve Türkay (2017) ele aldıkları tesis yeri seçimi probleminde sosyal faktörleri altı grupta incelemiştir: talebin karşılanması, kaynak eşitliğinin sağlanması, iş fırsatlarının oluşturulması, bölgesel gelişmenin sağlanması, bölgenin güvenlik düzeyi ve sağlık tesislerine erişim düzeyi.

Öte yandan, bölgesel gelişmenin sağlanması hedefi gözetilerek tesiste çalışan kişi sayısının belli bir seviyenin üzerinde tutulması sağlanabilir. Bu sebeple, tesislerdeki çalışan sayısının belirli bir düzeyde tutulması sosyal hedef olarak belirlenmiştir. Bu hedefin belirlenmesinin ardındaki temel sebep atık beyaz eşya talebindeki yüksek değişkenliktir (Bal ve Satoğlu, 2018). Bu değişkenlik bazı dönemlerde işten çıkarmalara sebep olabilmektedir. Hem işverenler hem de hükümetler için iş gücünü belirli bir seviyenin üzerinde tutmak ve iş fırsatlarının devamlılığını sağlamak önemlidir. Hükümetler işgücü düzeyinin gerilemesini istemezler. Öte yandan işverenler de işten çıkarmalar için tazminat ödemek ve sendikalar ile karşı karşıya gelmek istemezler. Bu sebeple modelde daha düzenli bir işgücü düzeyinin sağlanması sosyal hedef olarak belirlenmiştir.

3.1 Veri Analizi

Yönetmelikler gereği, elektrikli ve elektronik ekipman üreticilerinin gerçekleştirdikleri geri dönüşüm faaliyetlerine dair verileri Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'na iletmeleri gerekmektedir. Bu sebeple verinin doğru bir şekilde toplanması ve bunun doğru bir şekilde raporlanması üreticiler için oldukça önemlidir. Aynı zamanda toplanan veriler imalat, lojistik, yönetim ve pazarlama açısından çıkarımlar yapmak için oldukça değerli bir kaynaktır. Öte yandan, üretim ve lojistik operasyonları ile ilgili olarak birçok noktada veri toplanıyor olması çok büyük boyutlarda veri oluşmasına yol açmaktadır. Bu veriler erişilebilir olmasına rağmen klasik istatistik araçları ile değerlendirilmesi zordur. Bu nedenle araştırmacılar ellerindeki verilerden bilgiyi daha verimli ve etkin bir biçimde elde edebilmek için farklı segmentasyon araçlarına ihtiyaç duymaktadırlar (Sarvari et al. 2016).

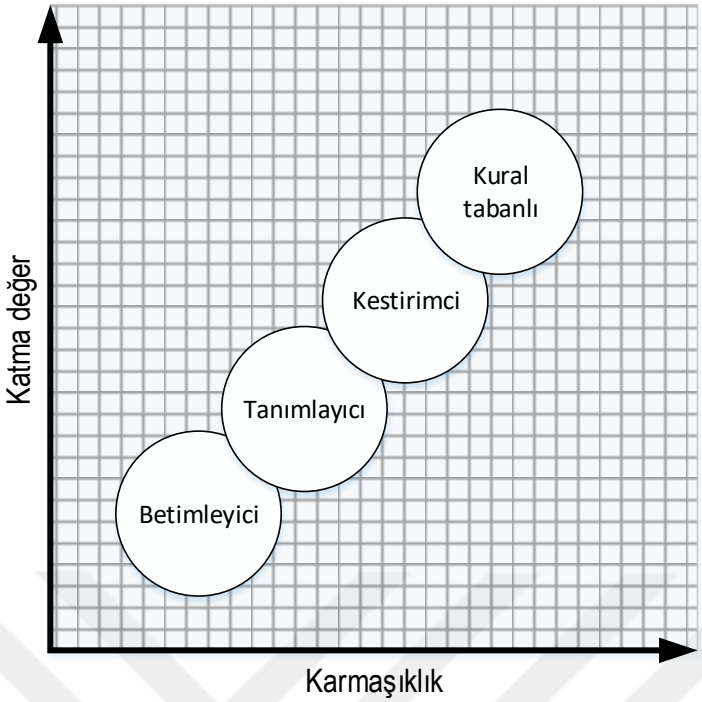
Veri analitiği yaklaşımı iş süreçlerinin analiz edilmesi ve bu süreçlerdeki verimliliğin artırılması amacıyla kullanılan kalitatif ve kantitatif teknikleri ifade etmektedir. Veri analitiği aynı zamanda veri analizi olarak da isimlendirilmektedir. Veri analitiği yaklaşımı ile iş süreçlerinden veri çıkartılmakta ve verinin yapısını, modelini anlayabilmek amacıyla veri kategorize edilmektedir. Veri analitiği dört seviyede ele alınmaktadır. Şekil 3.2'de görülebileceği gibi betimleyici, tanımlayıcı, kestirimci ve kural tabanlı olarak ayrılmaktadır.

Betimleyici veri analitiği:

Betimleyici analizler ile birçok veri kaynağından elde edilen ham veri ile çalışılır ve geçmişe dönük çıkarımlar ortaya konulur. Bu çıkarımlar basit manada bir şeyin doğru ya da yanlış olduğunu göstermektedir ancak sebebini açıklamamaktadır. Bir perakendecinin haftalık satış rakamları ya da bir üreticinin bir önceki aya dair geri dönen ürün oranı örnek olarak gösterilebilir.

Tanımlayıcı veri analitiği:

Bu aşamada geçmiş veri başka veri kaynakları ile kıyaslanabilir ve böylece bir olayın neden gerçekleştiğinin cevabı bulunabilir. Tanımlayıcı veri analitiği ile veri modellerinin birbirine olan bağlılıkları ortaya konulabilir. Örneğin, bir hastanede müşteri segmentasyonu hastalara konulan teşhisler ya da yazılan reçeteler ile birlikte yapılırsa hastaneye yatış riski hesaplanabilir.



Şekil 3.2: Veri analitiğinin dört aşaması.

Kestirimci veri analitiği:

Kestirimci veri analitiği ile neyin gerçekleşmek üzere olduğunun cevabı bulunmaktadır. Bu aşamada, betimleyici ve tanımlayıcı veri analitiğinin bulguları kullanılarak eğilimler, kümeler tanımlanır ve gelecek trendler öngörülür. Örneğin, bir hızlı tüketim ürünleri firması marka konumlandırmasını değiştirdiğinde neler ile karşılaşabileceğini kestirimci analizler yaparak öngörebilir.

Kural tabanlı veri analitiği:

Kural tabanlı veri analitiğinin amacı gelecek problemleri ortadan kaldırmak için neler yapılması gerektiğini ortaya koymak ya da gelecek trendi dikkate alarak bundan en iyi şekilde avantaj sağlayabilecek stratejiyi göstermektir. Kural tabanlı veri analitiğinde makine öğrenmesi gibi ileri algoritmalar kullanılmaktadır. Firmaların müşteri analizleri yaparak aynı ürünleri tekrar satabilmesi için çıkarımlar yapması örnek olarak verilebilir.

3.1.1 Veri analitiği yaklaşımının atık beyaz eşya verilerine uygulanması

Bu çalışmada kullanılan veri seti bir beyaz eşya üreticisinin geri dönüşüm sistemi veri tabanından elde edilen veriler ile yapılmıştır. Veri seti yaklaşık olarak yarım milyon adetlik geri dönüşüm için toplanmış olan ömrünü tamamlamış beyaz eşyalara dair veri

kayıtlarını içermektedir. Veriler atık elektrikli ve elektronik atıkların (AEEE) kontrolü yönetmeliğindeki (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012) 1. kategoriye ait olan ürünleri yani buzdolabı, soğutucu, klima, büyük beyaz eşyaları (çamaşır makinesi, kurutma makinesi, bulaşık makinesi ve ocak) içermektedir. Veri analizi IBM SPSS Modeler ve IBM SPSS 23 yazılımları kullanılarak yapılmıştır. Çizelge 3.3'te analizi yapılan ömrünü tamamlamış beyaz eşya verisine ait veri kategorileri ve bu kategorilere ait açıklamalar verilmiştir.

Çizelge 3.3: Veri kategorileri.

Alan değişkeni	Açıklama
Kampanya	Müşterilerin ömrünü tamamlamış beyaz eşyalarını teslim etmeleri için genellikle her yıl 3. çeyrek sonunda yapılan, yeni beyaz eşya alımında indirim ya da özel teklifler içeren kampanyalar.
Ömür	Eski ürünler toplanırken üretim tarihleri ve toplanma zamanları kaydedilmektedir. Böylece toplama zamanları dikkate alınarak ürün ömürleri hesaplanmıştır.
Ürün grubu	Ömrünü tamamlamış beş ürün grubu: Buzdolabı, Çamaşır Makinesi, Bulaşık Makinesi, Kurutma Makinesi, Fırın.
Bölge	Ülke çapında lojistik koşullara göre ayrılmış 10 bölgeyi göstermektedir.
Aynı / farklı ürün	Yeni satılan ürün ile atık ürün aynı tip ürünler mi? Yani, yeni satılmış olan belirli bir markanın belirli model çamaşır makinesi ile atık olarak alınan eski çamaşır makinesinin aynı olması durumunda ürün aynı kabul edilmektedir.
Değişim saati	Müşterinin eski beyaz eşyasını teslim edip yeni beyaz eşyasını ya da küçük ev aletlerini aldığı zaman.

Pearson korelasyon testi ile ürün değişim tarihi ve kampanya zamanı arasındaki ilişkinin belirlenmesi:

Her yıl 3. çeyrek sonunda yapılan kampanyaların etkisini değerlendirmek amacıyla toplanan atık ürün sayısı ile kampanya dönemi arasında ilişki olup olmadığı araştırılmak istenmiştir. Bu sebeple ürün teslim tarihleri ve kampanya tarihi arasındaki ilişkiye bakılmıştır. Ürün teslim tarihleri 'değişim tarihi' kategorisinde, kampanya tarihleri ise 'kampanya' kategorisinde bulunmaktadır. İki kategori için Pearson korelasyon testi yapılmıştır.

$$H_0: \rho = 0 \tag{3.1}$$

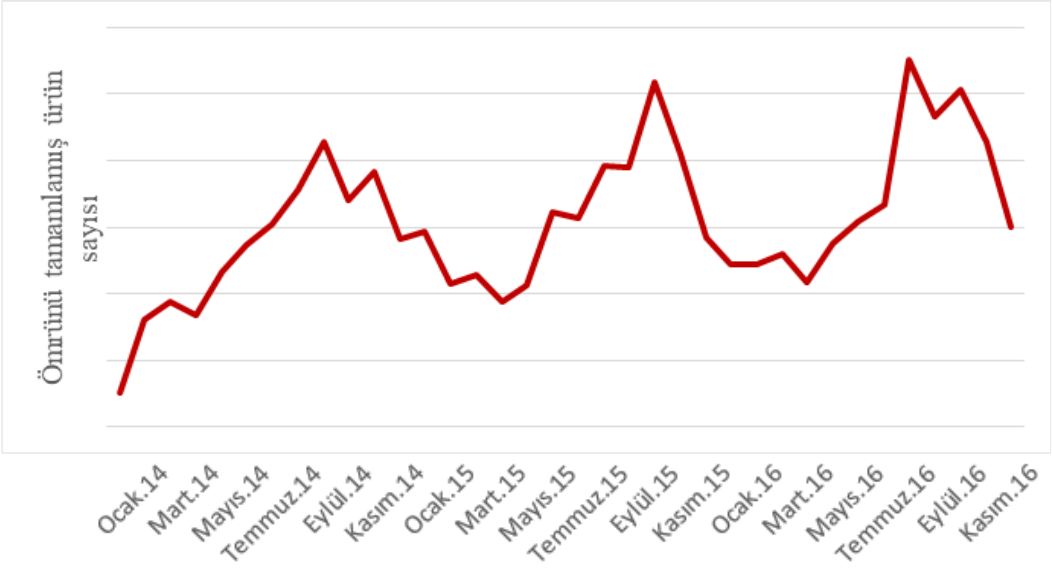
$$H_A: \rho \neq 0 \tag{3.2}$$

Çizelge 3.4: Ürün değişim tarihi ve kampanya zamanı arasında Pearson korelasyon testi.

		DEĞİŞİM TARİHİ	KAMPANYA
DEĞİŞİM TARİHİ	Pearson Korelasyonu	1	,983**
	Anl. (çift kuyruklu)		,000
	N	633525	322334
KAMPANYA	Pearson Korelasyonu	,983**	1
	Anl. (çift kuyruklu)	,000	
	N	322334	322334

**Korelasyon anlamlılık derecesi 0.01(çift kuyruklu).

Pearson korelasyon testinden elde edilen sonuçlar ömrünü tamamlamış beyaz eşyalara ait olan verideki ürün değişim tarihi ve kampanya zamanı arasında güçlü bir pozitif doğrusal ilişki olduğunu göstermektedir. Bu durum müşterilerin ömrünü tamamlamış ürünlerini kampanya tarihlerinde vermeye meyilli olduklarını göstermektedir. Öte yandan, şekil 3.3'den de görülebileceği gibi 3 yıl boyunca toplanan ürün miktarına ve bu miktarlardaki zamana bağlı değişime bakıldığında her yılın son çeyreğinde toplanan ürün miktarındaki artış rahatlıkla görülebilmektedir. Ürün sayılarına dair tam veriler gizlilik sebebiyle grafikte belirtilmemiştir.



Şekil 3.3: Aylık bazda toplanan ömrünü tamamlamış beyaz eşya miktarı.

ANOVA testi ile coğrafi bölgelere ve ürün gruplarına göre analizler:

Aynı zamanda ülke genelindeki farklı bölgelere göre müşteri davranışlarında değişiklik olup olmadığının gözlemlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, ülkedeki farklı bölgelere göre marka tercihlerinde değişiklikler olup olmadığına bakılmıştır. Satışı gerçekleşen beyaz eşya markaları alt segment ve üst segment markalar olarak iki gruba ayrılmıştır. Ardından, yine ülkedeki farklı bölgeler dikkate alındığında ürün ömürlerinde farklılık olup olmadığı araştırılmıştır. Varyans analizi ile aşağıdaki hipotezler test edilmiştir:

H_0: Yeni alınan beyaz eşya markaları bölgelere göre farklı göstermemektedir.

H_A: Yeni alınan beyaz eşya markaları bölgelere göre farklı göstermektedir.

Çizelge 3.5: Ürün markaları için ANOVA test sonuçları.

	Kareler toplamı	df	Ortalama kare	F	Anl.
Gruplar arası	1844,370	9	204,930	216,670	,000
Gruplar içi	262955,880	608029	,946		
Toplam	264800,249	608020			

%95 güven aralığında yapılan F testi (varyans analizi) sonuçlarına göre 'yeni ürün markası' için anlamlılık derecesi $p = 0.000 < 0.05$ olarak bulunmuştur. Yeni ürün markası için alternatif hipotez (H_A) kabul edilebilir. Başka bir deyişle, bölgelere göre ürün marka tercihleri farklılık göstermektedir. Aşağıdaki çizelgede bir bölgede satılan alt segment ve üst segment ürün gruplarının birbirlerine oranının bölgelere göre dağılımı gösterilmiştir. Böylece bu orana bakılarak bölgelere göre alt/üst segment ürün tercihlerinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Çizelge 3.6'ya bakıldığında ülkenin batı kesimlerinde alt/üst segment oranının azaldığı yani üst segment ürünlerin alt segment ürünlere kıyasla daha fazla tercih edildiği görülmektedir. Aynı şekilde ülkenin doğu kesimlerde alt segment ürünlerin daha fazla satıldığı görülmektedir.

Çizelge 3.6: Bölgelere ürün alt ve üst segment ürün tercih oranları.

	Alt Segment / Üst Segment
Doğu Marmara Bölgesi	0,067
Kuzey Ege Bölgesi	0,078
İç Anadolu Bölgesi	0,114
Trakya Bölgesi	0,116
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	0,133
Karadeniz Bölgesi	0,140
Batı Ege Bölgesi	0,146
İç Ege Bölgesi	0,157
Batı Akdeniz Bölgesi	0,182
Doğu Anadolu Bölgesi	0,190

Satın alınan beyaz eşya markalarının bölgelere göre farklılık gösterip göstermediği test edildikten sonra bölgelere göre ürün ömürlerinin farklılık gösterip göstermediği F testi (varyans testi) ile değerlendirilmiştir.

H_0: Atık olarak toplanmış olan ürün ömrü bölgelere göre farklı göstermemektedir.

H_A: Atık olarak toplanmış olan ürün ömrü bölgelere göre farklı göstermektedir.

Çizelge 3.7: Ürün yaşam ömürleri için ANOVA test sonuçları.

	Kareler toplamı	df	Ortalama kare	F	Anl.
Gruplar arası	54283,137	9	6031,460	486,735	,000
Gruplar içi	3635717,567	633516	12,392		
Toplam	3690000,705	633525			

Ömrünü tamamlamış beyaz eşyaların ömür verisi ile %95 güven aralığında yapılan F testi (ANOVA testi) sonuçlarına göre anlamlılık değeri $p = 0.000 < 0.05$ olarak bulunmuştur. Bu durumda alternatif hipotez (H_A) kabul edilmiştir. Başka bir deyişle, beyaz eşya ürün ömürleri (ömrünü tamamlamış ürün olarak toplanmış olan beyaz eşyalar dikkate alındığında) bölgelere göre farklılık göstermektedir. Türkiye genelinde 10 farklı bölge dikkate alınarak, bölgelere göre ürün ömürleri Çizelge 3.8'de gösterilmiştir. Bu çizelgede görülebileceği üzere Marmara ve İç Anadolu Bölgesi en uzun ürün kullanım süresine sahiptir.

Çizelge 3.8: Bölgelere göre atık olarak toplanmış olan beyaz eşya ürün ömürleri.

	Ürün ömrü (yıl)
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	6.25
Karadeniz Bölgesi	6.31
Batı Ege Bölgesi	6.45
İç Ege Bölgesi	6.67
Doğu Anadolu Bölgesi	6.95
Batı Akdeniz Bölgesi	6.97
Trakya Bölgesi	6.98
Doğu Marmara Bölgesi	7.09
Kuzey Ege Bölgesi	7.09
İç Anadolu Bölgesi	7.55

3.1.2 Veri analizi sonuçlarının değerlendirilmesi

Tezin bu kısmında tersine lojistik operasyonlarına dair olan atık beyaz eşyalar ile ilgili verilerin analizi yapılmıştır. SPSS yazılımının çeşitli araçları kullanılarak 3 yıla ait (2014-2016) toplanmış olan atık beyaz eşyalara dair veriler değerlendirilmiştir. Farklı değişkenler göz önünde bulundurularak müşteri davranışlarının ve tercihlerinin anlaşılması amaçlanmıştır. Öncelikle eldeki mevcut veri dikkate alındığında veri kategorileri kampanya, ömür, ürün grubu, bölge, ürün değişim saati ve yenisi ile değiştirilen atık ürünün aynı ya da farklı tipte ürün olup olmaması olarak belirlenmiştir.

Yıllara göre toplanan ürün miktarına bakıldığında her yılın belirli döneminde toplanan ürün miktarlarında ciddi oranda artışlar olduğu görülmüştür. Bu durum mevsimsel bir etkiye işaret etmektedir. Toplanan ürün sayısındaki artışların kampanya dönemlerine denk gelmesi sebebiyle Pearson korelasyon testi ile kampanya zamanı ve atık ürünlerin toplandığı tarihler arasındaki ilişkiye bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kampanya zamanı ve atık ürünlerin toplandığı tarihler arasında güçlü bir pozitif doğrusal ilişki bulunmuştur.

Öte yandan, bölgelere göre ürün ömürlerinde ya da marka tercihlerinde farklılıklar olup olmadığı araştırılmak istenmiştir. Elde edilen sonuçlar bölgelere göre ürün ömürlerinde ve marka tercihlerinde anlamlı derecede farklılık olduğunu göstermiştir. Ayrıca, bölgelere göre ürün ömrü ve marka tercihleri arasındaki farklar 3.6 ve 3.8 nolu çizelgelerden görülebilmektedir.

3.2 Çok Amaçlı Modelleme

Optimizasyon yöneylem araştırmasında sıklıkla kullanılmakta ve çeşitli uygulamaları bulunmaktadır. Amaç, kısıtları olan bir fonksiyonu en büyüklemek ya da en küçüklemektir (karın en büyüklenmesi ya da çevresel etkinin en küçüklenmesi). Ancak, birçok durumda karar vericiler çok sayıda farkı amaç fonksiyonunu optimize etmek istemektedir. Bu durum çok amaçlı optimizasyonu gerektirmektedir. Tek amaçlı optimizasyon problemlerinde elde edilen çözümün diğer çözümlere göre üstünlüğünü kıyaslamak kolaydır. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde ise birbiri ile çelişen amaçlar bulunabilmekte ve bu durum problemi daha karmaşık hale getirmektedir.

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin genel matematiksel formu şu şekildedir:

$$enk/enb\ f_m(x) \qquad m = 1,2,\dots,M \tag{3.3}$$

$$\text{öyle ki } g_j(x) \geq 0 \qquad j = 1,2,\dots,J \tag{3.4}$$

$$h_k(x) = 0 \qquad k = 1,2,\dots,K \tag{3.5}$$

$$x_i^{alt\ sınır} \leq x_i \leq x_i^{\text{üst sınır}} \tag{3.6}$$

3.3 nolu denklem M adet amaç fonksiyonunu göstermektedir. 3.4 ve 3.5 nolu denklemler sırasıyla eşitsizlik kısıtlarını ve eşitlik kısıtlarını göstermektedir. 3.6 nolu denklem ise karar değişkenleri için alt ve üst sınır değerlerini ifade etmektedir.

Hedef Programlama:

Hedef programlama, hedeflerin bir kısıtlar kümesi ile belirlendiği doğrusal programlanın bir uzantısıdır. Hedef programlamada iki temel model vardır:

- Önceliklendirilmiş (Leksikografik) model
- Ağırlıklandırılmış model

Önceliklendirilmiş hedef programlama modelinde hedefler önceliklere göre sıralanır. Öncelikle en önemli hedef sağlanmaya çalışılır. Ardından sırasıyla diğer hedefler mümkün olan en iyi şekilde karşılanmaya çalışılır. Önceliklendirilmiş hedef programlamada amaçlar en önemliden daha az önemli olana göre sıralanır. Öncelikle, birinci hedef için en iyi değer bulunur. Bu değer bulunduktan sonra birinci hedef kısıt olarak yazılır. Öyle ki birinci hedefin bulunmuş olan en iyi değeri belirli bir miktardan fazla değişmez. Bu miktar bulunmuş olan en iyi değerin sabit bir miktarı ya da belirli bir yüzdesi olabilir. Ardından, ikinci en önemli hedef optimize edilir ve süreç böyle işletilir.

Ağırlıklandırılmış modelde ise her bir amaç için ağırlıklar belirlenir ya da her bir amaç değerinde hedefe ulaşılamadığı durumlar için bir ceza puanı verilir. Ceza puanı verildiği durumda, hedefler kısıt olarak yazılır ve her bir hedef için belirlenen ceza değerlerinin ağırlıklandırılmış toplamı en küçüklenir. Amaçlar için ağırlıklar verilmesi durumunda ise hedefler verilen ağırlıklara göre tek bir amaç fonksiyonu olarak yazılır ve bu amaç fonksiyonu optimize edilir.

3.2.1 Önerilen optimizasyon modeli

Bu çalışmada, dört farklı hedef belirlenerek tersine tedarik zincirinde lojistik operasyonların planlaması problemine odaklanılmıştır. Önerilen model, önceden belirlenmiş toplama noktalarından toplanacak / geri dönüştürülecek AEEE miktarını, toplama zamanını belirlemektedir. Bu karar verilirken, maliyet & kazanç unsurları, üretilen emisyon miktarı, mevcut işgücü, AEEE toplama hedefi, tesislerin kapasiteleri ve tesisler ile toplama noktaları arasındaki mesafeler dikkate alınmaktadır. Modelde tersine lojistik maliyetlerinin azaltılması, çevresel etkilerin azaltılması, işgücünün dengelenmesi ve yasal hedefler dikkate alınarak dört amaç belirlenmiştir. Önerilen model, sürdürülebilirlik perspektifi ile tersine tedarik zincirinde taktik düzey kararların verilmesini sağlayan çok ürünlü, çok tesisli ve çok periyotlu bir karma tamsayılı doğrusal programlama modelidir.

Modelin dört hedefi bulunmaktadır:

- Tedarik zinciri operasyonlarından kaynaklanan maliyetlerin enazlanması.
- Tedarik zinciri operasyonlarından kaynaklanan çevresel etkinin enazlanması.
- Geri dönüşüm tesislerinde ihtiyaç duyulan işgücünün dengelenmesi.
- AEEE'lerin toplanması ile ilgili yasal sorumlulukların yerine getirilmesi.

Modelin varsayımları

- Ürünler şehirlerin merkez noktalarından toplanmaktadır. Şehir içi rotalama bu çalışma kapsamında değildir.
- Geri dönüşüm maliyeti yıllara göre değişmemektedir.
- Ürün toplama noktaları bilinmektedir ve geri dönüşüm tesis sayısı sabittir.
- Maliyet parametreleri; malzeme, operasyon, geri dönüşüm, nakliye, işe alma, işten çıkarma ve sabit maliyetler olarak önceden bilinmektedir.
- Elde bulundurma ve elde bulundurmama maliyeti ihmal edilmiştir.

Kümeler

i: ürün çeşidi kümesi, $i \in 1 \dots I$
j: geri dönüştürülen malzeme tipi kümesi, $j \in 1 \dots J$
k: şehir kümesi, $k \in 1 \dots K$

l: tesis kümesi, $l \in 1 \ldots L$

t: periyot kümesi, $t \in 1 \ldots T$

Sabitler

BG: büyük bir sayı

EOQ: ekonomik sipariş miktarı

$FTL(araç)$: bir nakliye aracı için tam yük miktarı

$G(gram/birim\ araç/km)$: bir km nakliye işleminden kaynaklanan emisyon

$MH(saat)$: bir çalışan için bir aylık çalışma saati

$MR(\%)$: en az ürün toplama oranı

$RB(\$/kişi)$: bir işçinin aylık maliyeti

$RC(\$/kişi)$: işe alma maliyeti

$RD(\$/kişi)$: işten çıkarma maliyeti

$RT(\$/araç)$: Nakliye işleminin sabit maliyeti

$WM(\%)$: en yüksek işgücü oranı; $(WM \geq 100\%)$

Parametreler

ß$_t(gram)$: Bir dönemdeki nakliye operasyonlarından kaynaklanan CO_2 emisyonunun hedef değeri

$CAP_{lt}(birim$ ürün$)$: t periyodunda l tesisinin kapasitesi

$d_{kl}(km)$: talep noktası k ve geri dönüşüm tesisi l arasındaki mesafe

$DM_{ikt}(birim$ ürün$)$: t periyodunda k bölgesinde satılan i ürün miktarı

$E_i(gram)$: i ürününün geri dönüşümünden kaynaklanan emisyon miktarı

$\varepsilon_t(gram)$: t periyodunda gerçekleşen tüm geri dönüşüm operasyonlarından kaynaklanan CO_2 emisyonu hedef değeri

$FA_i(saat)$: i ürününün geri dönüştürmek için gerekli olan adam $-$ saat işgücü

$F_t(birim)$: t periyodundaki toplama hedefi

$L_t(kişi)$: t periyodundaki hedef çalışan sayısı

$MS_{ij}(\$/kg\ malzeme)$: i ürününün geri dönüşümünden elde edilen j materyalinin parasal değeri

$O_{it}(\%)$: i ürününün toplanması gereken yüzdesi

$PR_i(\$/araç/km)$: i ürününü nakletmenin maliyeti

$RA_i(\$/birim$ ürün$)$: i ürününü geri dönüştürmenin maliyeti

$RP_i(\$/birim$ ürün$)$: toplanmayan i ürününün ceza maliyeti

$RS_{ij}(kg/birim$ ürün$)$: i ürününden geri dönüştürülen j malzeme miktarı

$SM_{it}(birim$ ürün$)$: t $periyodunda$ $satılan$ i ürünü $miktarı$

$TR_{it}(\$)$: t $periyodunda$ i ürününü $geri$ dönüştürmenin $hedef$ $maliyeti$

<u>*Karar değişkenleri*</u>

H_{lt}: t $periyodunda$ l $tesisinde$ $işe$ $alınan$ $kişi$ $sayısı$

M_{lt}: t $periyodunda$ l $tesisinde$ $işten$ çıkarılan çalışan $sayısı$

W_{lt}: t $periyodunda$ l $tesisinde$ çalışan $sayısı$

X_{ikt}: k bölgesinde t $periyodunda$ $toplana/geri$ dönüştürülen ürün $miktarı$

Y_{kt} $\begin{cases} 1, & eğer\ k\ bölgesinde\ t\ periyodunda \text{ ürün } toplanıyorsa \\ 0, & aksi\ takdirde \end{cases}$

$e_t^-, e_t^+, f_{it}^+, f_{it}^-, p_t^+, p_t^-, tr_{it}^+, tr_{it}^-$: $hedeften$ $sapmaya$ ait değişkenler

<u>*Matematiksel model*</u>

$$Min\ Z1 = \sum_i \sum_t f_{it}^- \tag{3.7}$$

$$Min\ Z2 = \sum_i \sum_t tr_{it}^+ \tag{3.8}$$

$$Min\ Z3 = \sum_l \sum_t p_{lt}^- \tag{3.9}$$

$$Min\ Z4 = \sum_t e_t^+ \tag{3.10}$$

Öyle ki,

$$\begin{aligned} &\sum_i \sum_k \sum_l X_{ikt} RA_i + W_{lt} RB + H_{lt} RC + M_{lt} RD \\ &+ \sum_i \sum_k \sum_l d_{kl}\, PR_i \frac{x_{ikt}}{FTL} \\ &+ \sum_i \sum_k \frac{x_{ikt}}{FTL} RT + \sum_i \sum_k (DM_{ikt} - X_{ikt}) RP_i \\ &- \sum_i \sum_j \sum_k X_{ikt} RS_{ij} MS_{ij} \\ &= \sum_i (TR_{it} + tr_{it}^+ - tr_{it}^-)\,; \quad (\forall t \in T) \end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\sum_k \sum_t X_{ikt} = \sum_t O_{it} SM_{it} + f_{it}^{+} - f_{it}^{-}\ ; \quad (\forall i \in I) \tag{3.12}$$

$$\sum_i \sum_k X_{ikt} E_i + \sum_k \sum_l \frac{X_{ikt}}{FTL} Gd_{kl} = \varepsilon_t + \beta_t + e_t^{+} - e_t^{-}; \quad (\forall t \in T) \tag{3.13}$$

$$W_{lt} = Çalışan_hedefi_{lt} + p_{lt}^{+} - p_{lt}^{-}; \quad (\forall t \in T, \forall l \in L) \tag{3.14}$$

$$W_{lt} \geq \sum_i X_{ikt} FA_i\ /MH; \quad (\forall t \in T, \forall l \in L) \tag{3.15}$$

$$W_{lt} \leq \sum_i X_{ikt} FA_i \times WM/MH\ ; \quad (\forall t \in T, \forall l \in L) \tag{3.16}$$

$$W_{lt-1} + H_{lt} - M_{lt} = W_{lt}; \quad (\forall t \in T, \forall l \in L) \tag{3.17}$$

$$\sum_i \sum_k X_{ikt} \leq CAP_{lt}; (\forall t \in T, \forall l \in L) \tag{3.18}$$

$$EOQ - \sum_i X_{ikt} \leq BG(1 - Y_{kt}); \quad (\forall t \in T, \forall k \in K) \tag{3.19}$$

$$\sum_i X_{ikt} \leq BG \times (Y_{kt}); \quad (\forall t \in T, \forall k \in K) \tag{3.20}$$

$$\sum_k \sum_t X_{ikt} \geq MR \times \sum_k \sum_t DM_{ikt}\ ; \quad (\forall i \in I) \tag{3.21}$$

$$\sum_{t=1}^{p} X_{ikt} \leq \sum_{t=1}^{p} DM_{ikt}\ ; \quad (\forall p = 1, \ldots, 12)\ (\forall i\ \in I\ , \forall k\ \in K) \tag{3.22}$$

$$Tüm\ değişkenler \geq 0 \tag{3.23}$$

$$X_{ikt}, H_{lt}, M_{lt}, W_{lt}\ \in Z^{+} \quad (\forall\ i, k, l, t);\ Y_{kt}\ \in \{0, 1\} \tag{3.24}$$

(3.7), (3.8), (3.9) ve (3.10) numaralı denklemler önerilen hedef programlama modelinin amaç fonksiyonlarını oluşturmaktadır. Amaç fonksiyonu (3.7) AEEE toplama hedefinden negatif sapmayı enküçüklemektedir. (3.8) numaralı amaç fonksiyonu maliyet hedefinden pozitif sapmayı enküçüklemektedir, (3.9) numaralı

amaç fonksiyonu çalışan hedefinden negatif sapmayı enküçüklemektedir ve (3.10) numaralı amaç fonksiyonu ise nakliye ve üretim operasyonlarından kaynaklanan toplam emisyon hedefinden pozitif sapmayı enküçüklemektedir.

(3.11) – (3.24) numaralı denklemler ise modelin kısıtlarını oluşturmaktadır. (3.11) numaralı kısıt üreticinin maruz kaldığı maliyeti ifade etmektedir. Modelde, maliyet hedefi tersine lojistik maliyetlerinin enküçüklenmesi olarak belirlenmiştir çünkü günümüz şartlarında tersine lojistik operasyonlarından kar elde edilmesi çok olası değildir. Kısıttaki maliyet bileşenleri geri dönüşüm operasyonlarından kaynaklanan sabit maliyet, istihdam maliyeti, nakliye işlemlerinden kaynaklanan sabit ve değişken maliyetler ve ömrünü tamamlamış ürünleri toplamamaktan kaynaklanan ceza maliyeti olarak ifade edilmiştir. Öte yandan, AEEE'lerin geri dönüştürülmesinden elde edilen aluminyum, cam, bakır gibi maddelerin satışı neticesinde elde edilen gelir, kazanç unsuru olarak belirlenmiştir. TR hedef maliyeti tanımlamaktadır ve 0 olarak belirlenmiştir çünkü hedef tüm maliyetler düşünüldüğünde başabaş noktasını yakalamaktır. Kısıt (3.12) yönetmeliklere göre belirlenen AEEE toplama hedefini tanımlamaktadır. İlgili döneme ait mevcut satışları (SM_{it}) ve toplamaya / geri dönüştürmeye karar verilen ürün miktarını (X_{ikt}) dikkate alarak toplama oranından (O_{it}) gerçekleşen sapmayı hesaplamaktadır. Kısıt (3.13) her bir hurda ürünün tesis içerisindeki üretim operasyonlarından ve hurda ürünleri toplamak için gönderilen araçlardan kaynaklanan emisyonu açıklamaktadır. Toplam emisyon hedefi (ε_t, β_t) her bir periyotta gerçekleşen tüm operasyonlardan kaynaklanabilecek emisyon miktarı dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çalışan hedefinden gerçekleşen negatif sapmanın (p_{lt}^-) enküçüklenmesi üçüncü amaç olarak belirlenmiştir. Bu amaç ile ilişkili olarak, kısıt (3.14) her bir dönem için belirlenen çalışan hedefine göre her bir tesisteki çalışan sayısını (W_{lt}) düzenlemektedir. (3.15) ve (3.16) numaralı kısıtlar hesaplanan işgücünün gerekli olan en az işgücünden fazla olmasını ve izin verilen en yüksek işgücü düzeyini aşmamasını sağlamaktadır. Kısıt (3.17) bir önceki dönemde çalışan sayısını (W_{lt-1}) ve işe alınan ile işten çıkarılan çalışan sayılarını dikkate alarak işgücünü ilgili dönemdeki işgücünü (W_{lt}) dengelemektedir. Kısıt (3.18) her bir tesisin kapasitesini tanımlamaktadır. Böylece, her bir tesiste, her bir periyotta geri dönüştürülen ürün sayısı tesis kapasitesini geçemez. Kısıt (3.19) ve (3.20) ekonomik üretim miktarı kısıtı olarak belirlenmiştir. Bu iki kısıt koşullu kısıt olarak tanımlanmıştır ve hurda ürün toplamak için gönderilen

araçların en az ekonomik üretim miktarı (EOQ) kadar ürün toplamasını sağlamaktadır. Eğer bir bölgedeki hurda ürün miktarı ekonomik üretim miktarının (EOQ) altındaysa o bölgeye araç gönderilmeyecektir. Bu kısıtlarda, Y_{kt} 0-1 değişkendir ve kısıt (14)'ün ekonomik üretim miktarından (EOQ) büyük olacak şekilde toplamaya / geri dönüştürmeye karar verilen ürün miktarı (X_{ikt}) kadar olmasını sağlamaktadır. Bu durumda, kısıt (3.19) $(1 - Y_{kt})$ sebebiyle 0 olmaktadır. Aksi durumda ise toplamaya / geri dönüştürmeye karar verilen ürün miktarına (X_{ikt}) 0 değeri atanacaktır. EOQ tam araç yükü olarak belirlenmiştir böylece tam araç yükü olarak şehirlerden AEEE'lerin toplanması hedeflenmiştir. Kısıt (3.21) her bir bölgede ve her bir periyotta talebin (DM_{ikt}) en az belirli bir oranı (MR) kadar ürün (X_{ikt}) toplanmasını sağlamaktadır. Bu kısıt, modelin 0 emisyon üretmek için hiçbir ürün toplamamasını engellemektedir. Öte yandan, kısıt (3.22) ilk periyottan son periyoda kadar, bir periyotta toplamaya / geri dönüştürmeye karar verilen ürün miktarının (X_{ikt}) ilgili dönemdeki talebi aşmamasını sağlamaktadır. Kısıt (3.23) negatif olmama koşullarını ve kısıt (3.24) X_{ikt}, H_{lt}, M_{lt}, W_{lt}, Y_{kt} için tamsayı olma koşullarını tanımlamaktadır.

3.2.2 Çok amaçlı optimizasyon modelinin çözümü

Tek amaçlı optimizasyon modelleri direkt olarak tek bir sonuç elde edilebilecek şekilde bir çözülebilmektedir. Çok amaçlı optimizasyon modellerinde ise birden çok amaç bulunmaktadır ve modelin çözümü genel olarak tek bir en iyi sonuç vermemektedir. Bunun yerine tüm amaçları en iyileyen bir çözüm kümesi elde edilmektedir. Böyle durumlarda karar vericiler en iyi sonuç yerine en çok tercih edilebilecek sonuca bakmaktadır. Çok amaçlı modellemede en iyi çözüm kavramı Pareto-optimal ya da Pareto etkinlik kavramı ile yer değiştirmiştir. Pareto-optimal çözümler, modeldeki bir amacın en iyi değerini, diğer amaçların değerlerini kötüleştirmeden artırmanın mümkün olmadığı çözümlerdir. Pareto-optimal çözümlerin olduğu küme Pareto kümedir.

Çok amaçlı optimizasyon modellerinin çözümü genel olarak zordur. Bunun başlıca sebepleri verimli çözüm araçlarının eksik oluşu ve bu tip problemlerin karmaşık yapısıdır. Geniş anlamda bahsetmek gerekirse, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümü için üç yaklaşım bulunmaktadır:

- Direkt yaklaşım
- Birleştirme veya dönüştürme

- Pareto küme yaklaştırma yöntemleri

Direkt yaklaşım ile çözüm, özellikle birbiri ile çelişen amaçlar olması durumunda oldukça zordur. Bu sebeple, dönüştürme yapılarak, yani modeldeki amaçlar tek bir amaca dönüştürülerek çözüm gerçekleştirilir. Üçüncü yol ise birbirini domine etmeyen Pareto kümeyi elde etmek için yaklaştırma yöntemlerinin kullanılmasıdır. Bu yaklaşımda genel olarak sezgisel teknikler kullanılmaktadır (Papadimitriou ve Yannakakis, 2000; Zitzler ve Thiele, 1999). Özellikle genetik / evrimsel algoritmalar tercih edilmektedir. Sezgisel yöntemlerle bulunan çözümler için en tartışmalı konu çözüm kümesinin kalitesinin ölçülmesinin net bir şekilde gösterilememesidir (Zitzler ve diğ. 2002). Bu nedenle tezde Pareto küme yaklaşımı tercih edilmiştir.

Çok amaçlı optimizasyon modellerinin tek amaçlı modellere dönüştürülmesinde genel olarak ağırlıklandırılmış toplama ve fayda metodu kullanılmaktadır.

Ağırlıklandırılmış toplama yöntemi

Ağırlıklandırılmış toplama yöntemi, tüm amaç fonksiyonlarını bu fonksiyonların ağırlıklandırılmış toplamını kullanarak tek bir skalar amaç fonksiyonuna dönüştürmektedir.

$$F(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + \cdots + w_M f_M(x) \tag{3.25}$$

Ağırlıklandırılmış toplama yöntemi için en tartışmalı olan konu çözümün belirlenen ağırlık katsayılarına $w = w_1 + w_2 + \cdots + w_M$ son derece bağlı olmasıdır. Katsayıların tamamı pozitif olmalıdır ve katsayıların toplamı 1'e eşit olmalıdır:

$$\sum_{i=1}^{M} w_i = 1, \quad w_i \in (0,1) \tag{3.26}$$

Fayda metodu

Ağırlıklandırılmış toplama yönteminde ağırlıklar deterministik olarak belirlenmektedir. Fayda metodunda ise her bir alternatife ait kriterler için belirsizlik dikkate alınmaktadır. Bu açıdan, fayda metodu daha gerçekçidir çünkü her bir alternatif için çıktılar düşünüldüğünde her zaman bir belirsizlik olacaktır. Fayda fonksiyonu çeşitli şekillerde yazılabilmektedir ve en basitlerinden biri üstel fayda fonksiyonudur:

$$u(x) = \frac{1 - e^{-(x-min)/\rho}}{1 - e^{-(x_{maks}-x_{min})/\rho}} \quad (3.27)$$

Burada x_{maks} ve x_{min} sırasıyla x için en büyük ve en küçük değerleri, ρ ise karar verici için risk toleransını göstermektedir.

Fayda fonksiyonu karar verici tarafından eşit derecede kabul edilebilir amaç değerlerinin $f_1, \ldots, f_M$ kombinasyonunu tanımlamaktadır. Böylece, fayda sabitinin çevre çizgisi (kontürü) farksızlık eğrisi olarak tanımlanır. Böylece optimizasyon faydanın eniyilenmesi haline gelir.

Epsilon kısıt yöntemi

Çok amaçlı optimizasyon modellerini çözmenin ilginç bir yolu da amaç fonksiyonlarını, bir tanesi hariç, kısıt olarak yazmaktır. Aşağıdaki kısıt içermeyen enazlama problemini tek amaçlı kısıtlı optimizasyon problemi olarak yazacak olursak:

$$Enk\ f_1(x), f_2(x), \ldots, f_M(x) \quad (3.28)$$

Bu amaca erişmek için, genellikle karar vericinin tercihine göre en önemli amaç seçilir. Örneğin $f_q(x)$ diğer amaçlar için sınırları belirtirken, en önemli ana amaç fonksiyonu olsun. Şöyle ki:

$$Enk \qquad f_q(x) \quad (3.29)$$

$$\text{Öyle ki} \quad f_i \leq \in_i, \quad (i = 1,2, q-1, q+1, \ldots, M) \quad (3.30)$$

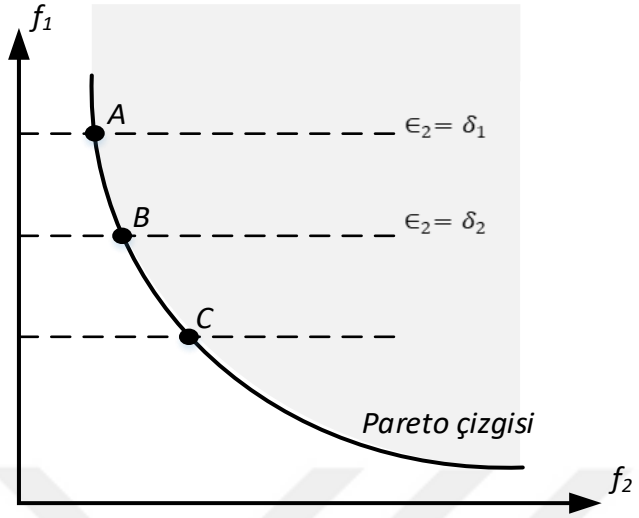
Burada $\in_i$ verilen sınırları göstermektedir. Bu problem tek amaçlı optimizasyon problemleri için olan standart optimizasyon algoritmaları ile çözülebilir. Esas itibarıyla, Epsilon kısıt yöntemi bir çeşit dilimleme metodudur ve çözüm alanını faklı alt alanlara bölmektedir. Örneğin, Şekil 3.4'de gösterilen iki amaçlı optimizasyon probleminde f_2 kısıt olarak alınırsa bu problem şöyle ifade edilir:

$$Enk \qquad f_1(x) \quad (3.31)$$

$$\text{Öyle ki} \quad f_2 \leq \in_2 \quad (3.32)$$

Burada $\in_2$ sabit bir sayıdır. $\in_2$'nin herhangi bir değeri için, çözüm alanı iki alt alana ayrılır: $f_2 \leq \in_2 = \delta_1$ (olurlu) ve $f_2 > \in_2 = \delta_2$ (olursuz). Olurlu alandaki f_1'in

enküçüklenmesi global en iyi nokta olan A'ya erişilmesini sağlar. Benzer olarak, $\in_2 = \delta_2$'nin başka bir değeri olarak f_1'in enküçüklenmesi B noktasını verir.



Şekil 3.4: Epsilon kısıt yöntemi ile çözüm alanının dilimlere ayrılması (Yang, 2014).

Epsilon kısıt yönteminin ağırlıklandırma yöntemlerine göre üstünlükleri vardır. Mavrotas'a (2013) göre bunlar şöyledir:

1. Doğrusal problemler için ağırlıklandırma metodu orijinal çözüm bölgesine uygulanmaktadır ve köşe noktaların çözümünü (ekstrem noktalar) vermektedir. Böylece, sadece etkin ekstrem çözümler bulunmaktadır. Epsilon kısıt yönteminde ise orijinal çözüm bölgesini değiştirir ve böylece ekstrem olmayan etkin çözümlerin de bulunmasını sağlar.
2. Ağırlıklandırma yöntemi tam sayılı programlama ve karma tamsayılı programlama problemleri için etkin çözümler üretemez ancak Epsilon kısıt yönteminde böyle bir sorun yoktur (Steuer, 1986; Miettinen, 1998).
3. Ağırlıklandırma yönteminde amaç fonksiyonlarının ölçeklendirilmesinin elde edilen sonuçlar üzerinde büyük etkisi vardır. Bu sebeple, ağırlıklandırma yönteminde amaç fonksiyonlarının genel bir ölçeğe göre yazılması gerekmektedir. Epsilon kısıt yönteminde bunun yapılmasına gerek yoktur.
4. Epsilon kısıt yönteminde her bir amaç fonksiyonu için aralıklar istenilen sayıda bölünerek üretilen etkin çözüm sayısı kontrol edilebilir. Bunun ağırlıklandırma yöntemi ile yapılması kolay değildir.

Verimli çözümün matematiksel tanımı şöyledir (tüm amaç fonksiyonları $f_i, i = 1, \dots, p$ optimizasyon olduğu durum için): Bir çok amaçlı optimizasyon problemi için olurlu çözüm x, diğer tüm olurlu çözümler x', $f_i(x') \geq f_i(x)\ \forall i = 1, \dots, p$ olması durumunda etkindir. Her bir etkin sonuç, çözüm uzayında daha fazla iyileştirilemeyen ya da diğer çözümler tarafından domine edilemeyen vektörlerdir. Eğer $f_i(x') \geq f_i(x)$ koşulu $f_i(x') > f_i(x)$ ile değiştirilirse zayıf etkin çözümler elde edilir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde zayıf etkin sonuçların diğer etkin sonuçlar tarafından domine edilme ihtimali vardır.

Literatürde, Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi'nin birçok geliştirilmiş versiyonu bulunmaktadır (Ehrgott and Ryan, 2002; Laumanns et al., 2006; Hamacher et al., 2007; Mavrotas, 2009; Mavrotas and Florios, 2013). Artırılmış Epsilon Kısıt Yöntemi 2'nin (AUGMECON2) (Mavrotas and Florios, 2013) diğer çok amaçlı matematiksel model çözüm yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği kanıtlandığı için bu yöntemin çözüm algoritması olarak kullanılmasına karar verilmiştir. AUGMECON2 aşağıda gösterildiği şekilde uygulanmıştır (Mavrotas and Florios, 2013):

$$min\ \ f_1(x) + eps \times \left(\frac{s_2}{fmax_2 - fmin_2} + 10^{-1} \times \frac{s_3}{fmax_3 - fmin_3} + 10^{-2} \times \frac{s_4}{fmax_4 - fmin_4}\right) \tag{3.33}$$

Öyle ki, (3.34)

$$f_2(x) + s_2 = fmin_2 + t \times (fmax_2 - fmin_2)/q_2 \tag{3.35}$$

$$f_3(x) + s_3 = fmin_3 + t \times (fmax_3 - fmin_3)/q_3 \tag{3.36}$$

$$f_4(x) + s_4 = fmin_4 + t \times (fmax_4 - fmin_4)/q_4 \tag{3.37}$$

$$x \in S\ and\ s_i\ \in\ R^+. \tag{3.38}$$

Bu formülasyonda f_1 'Yasal Hedef' değerini, f_2 'Maliyet Hedef' değerini, f_3 'Sosyal Hedef' değerini ve f_4 'Çevresel Hedef' değerini göstermektedir. Kısıtlardaki s_2, s_3, ve s_4 değerleri ise sırasıyla artık değişkenleri ifade etmektedir. Amaç fonksiyonlarının ödünleşme çizelgesinden elde edilen en büyük ve en küçük değerleri ise sırasıyla $fmax_i\ ve\ fmin_i$ ile ifade edilmektedir. f_i değeri $fmax_i - fmin_i$ aralığına eşittir, t aralık sayacıdır (eğer f_i aralığı 4'e bölündüyse t değeri 1'den 4'e kadar değişmektedir) ve q_i ise f_i amaç fonksiyonunun aralığının uzunluğudur. ϵ değeri 10^{-6} ve 10^{-3} (Mavrotas and Florios 2013) arasında göreceli olarak küçük bir sayıdır. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde Pareto-optimal sonuçların elde edilmesi gerekmektedir.

Pareto-optimal sonuç kümesini elde etmek için CPLEX çözücüsü ve GAMS® yazılımı kullanılmıştır.

3.2.3 Ödünleşme çizelgesinin elde edilmesi

Epsilon kısıt yönteminin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için amaç fonksiyonlarının aralık değerleri kısıt olarak kullanılan $p - 1$ adet amaç fonksiyonu için belirlenmelidir. Ancak amaç fonksiyonlarının aralıklarının hesaplanması basit bir işlem değildir (Reeves & Reid, 1988; Steuer, 1997; Isermann & Steuer, 1988). Optimizasyonda en iyi değeri bulmak göreceli olarak kolay iken etkin küme içerisinde en kötü çözüm değerini (nadir noktası) bulmak kolay değildir. Bu konuda en genel yaklaşım ödünleşme çizelgesinden (p adet amaç fonksiyonunun ayrı ayrı optimize edilmesi ile elde edilen tablo) faydalanarak aralıkların hesaplanmasıdır. Nadir değeri genellikle ödünleşme çizelgesinin ilgili sütunundaki en küçük değere denk gelmektedir. Ancak, bu durumda dahi amaç fonksiyonlarının ayrı ayrı optimizasyonundan elde edilen çözümlerin Pareto optimal çözüm olduğundan emin olunması gerekir. Alternatif optimum değerlerin olabileceği göz önüne alındığında ticari optimizasyon yazılımları ile elde edilen en iyi çözümün Pareto optimal sonuç olduğuna dair bir kesinlik yoktur. Bu belirsizliği giderebilmek amacıyla Mavrotas (2009) amaç fonksiyonlarının önceliklendirilmiş (leksikografik) olarak çözülmesini ve böylece ödünleşme çizelgesinin sadece Pareto optimal sonuçlardan oluşmasını önermiştir.

3.3 Veri Zarflama Analizi

Veri Zarflama Analizi (VZA) çok kriterli karar verme problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. İlk olarak Charnes ve diğ. (1978) tarafından Karar Verme Birimlerinin (KVB) göreceli verimliliklerini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. VZA temel olarak KVB'lerin ikili karşılaştırmasını yapmaktadır. Bu ikili karşılaştırmada KVB'ler verimli olanlar ve verimli olmayanlar olarak ayrıştırılmaktadır.

VZA'nın güçlü yönlerinden bir tanesi de çok girdili ve çok çıktılı modelleri değerlendirebilmesidir. Bu yönü ile VZA basit verimlilik oranı hesabından ayrışmaktadır. Yapılabilecek verimlilik iyileştirmelerine dair ölçülebilir değerler sunmaktadır. Bu sayede verimlilik hakkında farklı boyutlarda daha kapsamlı bilgi elde edilebilmektedir. VZA modeli girdiler ve çıktılar için farklı birimlerin kullanılmasına izin vermektedir. Karar verme birimleri, başka bir karar verme birimi ile ya da birden

çok karar verme birimi ile direkt olarak karşılaştırılabilmektedir. Öte yandan, elde edilen sonuçlar girdilerin ya da çıktıların seçimine bağlı olmaktadır. KVB'ler birbirleri arasında kıyaslanabilmektedir ancak sonuçlar en iyi şartlara göre test edilememektedir (Berg, 2010). Aynı zamanda, girdi ve çıktı sayısı arttıkça etkinlik sınırındaki verimli KVB sayısı da artış göstermektedir (Berg, 2010).

3.3.1 Veri zarflama analizinin matematiksel modeli

VZA çok ölçütlü performans değerlendirmelerinde ve kıyaslamalarda kullanılan temel yöntemlerden biridir. VZA, matematiksel programlama ile KVB'lerin girdi ve çıktıları dikkate alınarak bir performans kararı verilmesini sağlar. Bu performans kararının net bir ekonomik anlamı vardır: elde edilen sonuç performansın tüm boyutlarında elde edilebilecek en iyi oransal iyileştirmedir (girdilerin azaltılması ya da çıktıların artırılması). VZA modelleri girdi ya da çıktı odaklı olabilmektedir. Girdi odaklı modeller girdileri azaltmaya çalışırken, çıktı odaklı modeller çıktıları artırmaya çalışmaktadırlar. Her iki tip model için de verimlilik sonuçları aynı olmaktadır. Her bir karar verme birimi, etkinlik sınırındaki Pareto-Koopman verimli KVB ile kıyaslanmaktadır. Aşağıdaki model girdi odaklı olup, girdileri enazlamaya çalışırken çıktıları sabit tutmaktadır (Banker ve diğ. 1984).

$$\theta^* = Min\ \theta \tag{3.39}$$

$s.t$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j\, x_{ij} \leq \theta x_{i0} \qquad i = 1,2,\dots,m; \tag{3.40}$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j\, y_{rj} \geq y_{r0} \qquad r = 1,2,\dots,s; \tag{3.41}$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1 \qquad n \in \alpha \tag{3.42}$$

$$\lambda_j \geq 0 \qquad j = 1,2,\dots,n. \tag{3.43}$$

θ^* KVB için verimlilik derecesini göstermektedir. Eğer $\theta^* = 1$ ise KVB_0 etkinlik sınırındadır. Eğer diğer KVB'lerin skorları 1'den küçük ise ($\theta^* < 1$) KVB_0 diğerlerine baskın gelmektedir. x_{ij} ve y_{rj} parametreleri *j*. KVB'nin *i*. girdisini ve *r*. çıktısını göstermektedir. λ_j, *j*. KVB'nin kıyaslandığı birime göre katsayısını göstermektedir. VZA'da KVB için verimlilik derecesi çıktıların ağırlandırılmış toplamının girdilerin ağırlıklandırılmış toplamına bölünmesi ile elde edilir.

Model girdi odaklı olduğu için (3.39) değerlendirilen KVB girdileri enazlamaya çalışmaktadır. (3.40) değerlendirilen KVB'nin girdilerini diğer KVB'lerin girdilerinin

ağırlıklandırılmış toplamından küçük ya da eşit olmaya zorlamaktadır. (3.41) ise değerlendirilen KVB'nin çıktılarını diğer KVB'lerin çıktılarının ağırlıklandırılmış toplamından büyük ya da eşit olmaya zorlamaktadır. (3.42) λ_j katsayılarının toplamını 1'e eşitlemektedir ve (3.43) λ_j katsayılarını sıfıra eşit ya da sıfırdan büyük olmaya zorlamaktadır.

4. UYGULAMA

Önerilen model bir vaka analizi olarak gerçek veriler ile Türkiye'deki beyaz eşya geri dönüşüm ağı için uygulanmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Modelin çözümü neticesinde bir beyaz eşya üreticisi için bazı operasyonel kararlar elde edilmiştir. Üreticiler açısından bakıldığında AEEE'lerin geri dönüştürülmesi, üreticilerin sorumluluklarını yerine getirmeleri açısından oldukça önemlidir. Ayrıca, yasal düzenlemelere göre ürün geri dönüştürme oranları yıllar içerisinde artan bir şekilde değişim göstermektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015).

Mevcut durumda, müşteriler yeni bir ürün aldıklarında eski ürünlerini iade etme hakkına sahiptirler. Bu sebeple, teknik servis tarafından yeni ürün teslimatı yapılırken müşterinin talep etmesi durumunda eski ürün (AEEE) geri alınmak zorundadır. Ayrıca, elektrikli ve elektronik ekipman üreticileri her yıl gerçekleştirdikleri satış miktarının belirli bir yüzdesi kadar atık ürünü yasal olarak toplamak zorundadır (yasal hedef).

Önerilen ağ tasarımı; müşterilerden, bölgesel atık ürün toplama alanlarından, geri dönüşüm tesislerinden ve bunlar arasındaki ulaşım ağından oluşmaktadır. Tersine tedarik zinciri ağı müşteri yeni bir ürün aldığında eski ürünü teslim etme hakkının olduğu kabuluyle çalışmaktadır. Bu sebeple, üretici adına faaliyet gösteren teknik servis atık ürünü toplamaktadır ve kendi deposunda stoklamaktadır. Üçüncü parti lojistik şirketi ise toplanan atık ürünleri tüm servis noktalarından toplamak ve bu ürünleri geri dönüşüm tesisine ulaştırmaktan sorumludur. Geri dönüşüm tesisinde, ürünler öncelikle toplama alanında toplanmaktadır. Toplama alanı geri dönüşüm tesisi ile aynı alan içerisindedir. Ürünler geri dönüşüm işlemine girmeye hazır olduklarında, ürün tipine ve özelliklerine göre ayrılıp geri dönüşüm işlemine başlanmaktadır. Geri dönüşüm işlemi neticesinde demir, alüminyum, bakır, kompresör, plastik, kablo, geri dönüştürülebilir kloroflorokarbon ve cam gibi malzemeler elde edilmektedir. Elde edilen bu malzemeler, özelliklerine göre yeniden işlenmek ya da bertaraf edilmek üzere farklı tesislere gönderilmektedir. Şekil 4.1 tersine tedarik zinciri ağı için önerilen matematiksel modelin tedarik zincirinin hangi kısmına odaklandığını göstermektedir.

Ürün toplama süreci, servislerin ömrünü tamamlamış ürünleri müşterilerden alması ile başlayıp, servis noktalarından (bölgesel toplama alanları) geri dönüşüm tesislerine ürünlerin nakledilmesi ile devam etmekte ve geri dönüşüm tesislerinde ürünler geri dönüştürüldükten sonra ürünlerin ilgili pazarlara veya tesislere gönderilmesi ile son bulmaktadır. Modelleme ürünlerin bölgesel toplama alanlarından toplanıp, geri dönüşüm tesisinde işlenmesine kadar olan kısmını kapsamaktadır. Bu model ile sürdürülebilirlik hedefleri gözetilerek her bir periyottaki talep ve tesis kapasiteleri dikkate alınarak ürün toplama kararı verilmektedir.

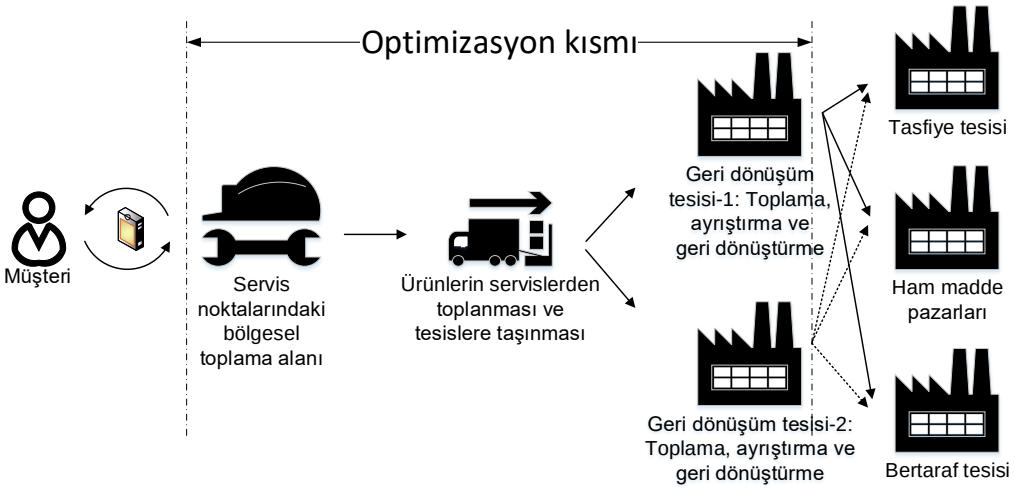
Yapılan uygulamada iki adet geri dönüşüm tesisi bulunmaktadır. Tesis konumları önceden belirlenmiş ve sabittir. Bu sebeple tesis yeri seçimi kararı verilmemektedir. Atık ürünler 81 şehirdeki bölgesel toplama noktalarında biriktirilmektedir. 12 aylık zaman periyodu dikkate alınmıştır. Modelde, şehirlerin merkez noktaları ve bu noktaların tesislere olan mesafeleri dikkate alınmıştır. Buzdolabı, çamaşır makinesi ve bulaşık makinesi olarak üç tip ürün geri dönüştürülmektedir. Buzdolabı birinci tesiste, çamaşır makinesi ve bulaşık makinesi ise ikinci tesiste geri dönüştürülmektedir. Aylık geri dönüşüm hedefi Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği'nde (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015) belirtilen 2016 yılına dair geri dönüşüm hedefi olan %5 dikkate alınarak %5 olarak belirlenmiştir. Bu oran satılan ürünlerin %5'i kadar ürünün geri dönüştürülmesi gerektiğini göstermektedir.

Üç tip ürünün satış miktarları bilinmektedir. Hedef çalışan sayısı, birinci tesis için 8, ikinci tesis için ise 12 olarak belirlenmiştir ($Çalışan_hedefi_{1t} = 8, Çalışan_hedefi_{2t} = 12$). Hedef maliyet sıfır ($TR_{it} = 0$) olarak belirlenmiştir. Böylece nakliye ve üretim işlemlerinden kaynaklanan operasyonel maliyetlerin geri dönüştürülen malzemelerin satışından elde edilen geliri aşmaması hedeflenmiştir. Tesislerdeki geri dönüşüm operasyonları ve nakliye sürecinden kaynaklanan CO_2 emisyonu için aylık hedef 55.000 kg/ay ($\varepsilon_t + \beta_t = 55.000\, kg/ay$) olarak belirlenmiştir. Bu emisyon değeri, yıl boyunca gerçekleşmesi beklenen ürün geri dönüşüm adedi, tesislerdeki geri dönüşüm operasyonlarındaki enerji tüketimi, nakliye operasyonları için gerekecek araç sayısı ve araç özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Model belirlenen CO_2 emisyonu hedefi değerini aşmamaya çalışmaktadır. Çizelge 4.1 uygulamaya ait detayları ve modelde kullanılan parametre değerlerini göstermektedir.

Çizelge 4.1: Uygulama detayları ve parametreler.

şehir sayısı	81	ülkedeki tüm şehirler
tesis sayısı	2	1: buzdolabı, 2: çamaşır makinesi ve bulaşık makinesi
ürün çeşidi	3	1: buzdolabı, 2: çamaşır makinesi, 3: bulaşık makinesi
ürün toplama hedefi (%)	5	2016 yılı için yasal hedef
hedef maliyet ($)	0	başabaş noktası
çevresel hedef (kg/ay)	55.000	tesis içi üretim ve nakliye operasyonlarından kaynaklanan emisyon
çalışan hedefi	8 (1. tesis), 12 (2. tesis)	
nakliye aracı motor tipi	Euro5 veya üstü	
geri dönüştürülen ürün	demir, alüminyum, bakır, kompresör, plastik, kablo, geri dönüştürülebilir kloroflorokarbon, cam	

Uygulamada, belirli bir periyotta karşılanması gereken kesin müşteri talebi olmadığı için stoksuz kalma maliyeti modelde bulunmamaktadır. Bunun yanında depolama maliyeti bulunmamaktadır çünkü firma toplanan ürünlerin depolanması için ayrı bir yatırım yapmamaktadır ve ürünler tesis içerisinde uygun yerlerde bekletilmektedir. Toplanan atık ürünler için herhangi bir satın alma maliyeti yoktur. Toplanan ürünlerin stoklanması için yeterli alan mevcuttur.



Şekil 4.1: Tersine lojistik ağında ürün toplama noktalarından geri dönüşüm tesislerine kadar optimize edilen kısım (Bal ve Satoğlu, 2018).

5. MATEMATİKSEL MODEL SONUÇLARI

Çok amaçlı optimizasyon modeli önceliklendirilmiş (leksikografik) olarak GAMS® programı ile kodlanmış ve CPLEX çözücüsü ile çözdürülmüştür. Modelin çözümünde 1.7 GHz Intel core i5 işlemcili ve 4 GB RAM olan, Windows işletim sistemine sahip dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Çizelge 5.1 modelin çözüm istatistiklerini ve sonuç raporunu göstermektedir. Hedef programlama modeli 42.044 kısıt ve 7.030 değişken içermektedir. Bu değişkenlerin 6876 tanesi tamsayılıdır. Model yasal hedef için çözdürüldüğünde en iyi sonuca ulaşılması 0,188 saniye almıştır. Ardından hedef programlama modeli, Epsilon kısıt modeline çevrilmiştir. Dört amaç fonksiyonu bulunduğu için dört adet ek kısıt ve artık değişkenler koyulmuştur. Bu model çözdürüldüğünde ise çözüm süresi ortalama olarak 0,328 saniye olmuştur. Modelin çözümü için harcanan çözüm süresi oldukça kısadır.

Çizelge 5.1: Optimizasyon modeli çözüm istatistikleri.

	Adet						
	Denklem kümesi	Değişken kümesi	Denklem	Değişken	Sıfırdan büyük elemanlar	Kesikli değişkenler	Çözüm süresi (s)
Hedef programlama	36	18	42044	7030	268829	6876	0.188
ϵ-kısıt modeli	40	22	42048	7034	268911	6876	0.328

Çizelge 5.2: Ödünleşme çizelgesi.

	Z1(yasal)	Z2(ekonomik)	Z3(sosyal)	Z4(çevresel)
Min Z1 (yasal)	**8948**	687163,844	7	203234,95
Min Z2 (ekonomik)	21956	**667692,730**	22	72152,00
Min Z3 (sosyal)	56075	978431,485	**5**	206964,30
Min Z4 (çev.)	56066	959096,742	39	**0**

Epsilon kısıt modelinin çözümünden elde edilen sonuçlara göre elde edilen ödünleşme sonuçları ödünleşme çizelgesinde (bkz. Çizelge 5.2) verilmiştir. Ödünleşme çizelgesinden görülebildiği gibi yasal hedef eniyilendiğinde toplanamayan 8.948 adet ürün olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, toplam maliyet 687.163,844$, çalışan hedefinden 12 aylık süreçte gerçekleşen sapma 7 kişi ve yine 12 aylık süreçte toplam emisyon hedefinden gerçekleşen sapma 203.234,95 kg olmaktadır.

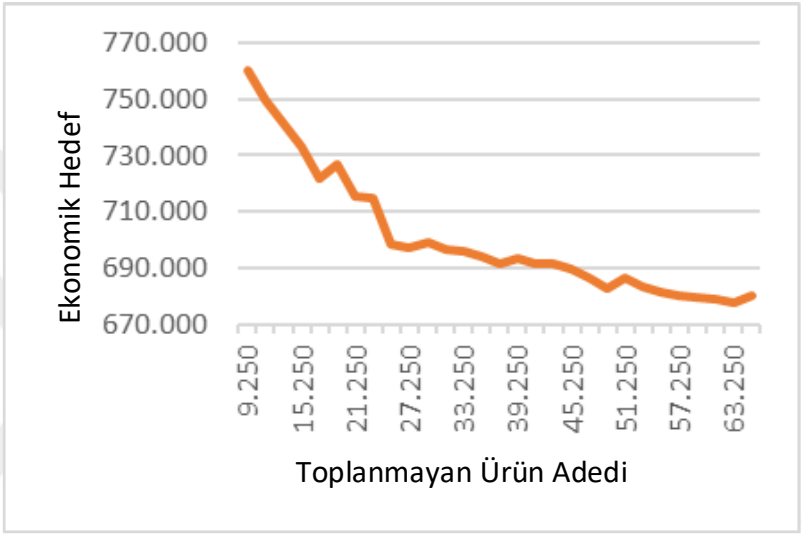
Ekonomik hedef eniyilendiğinde, en düşük maliyet 667.692,730$ olmaktadır. Toplanamayan ürün sayısı 21.956 adet, çalışan hedefinden gerçekleşen toplam sapma 22 kişi ve toplam emisyon hedefinden gerçekleşen sapma 72.152 kg olmaktadır. Bu durumda hedef emisyon değeri yaklaşık olarak %15 oranında aşılmaktadır. Emisyon hedefinden gerçekleşen bu sapma, model yasal, ekonomik ve sosyal hedeflere göre çözdürüldüğü zaman, Euro 5 motorlara sahip araçlar ile emisyon hedefinin yakalanamayacağını göstermektedir.

Sosyal hedef eniyilendiğinde ise, tüm periyotlar boyunca sosyal hedeften gerçekleşen sapma 5 kişi olmuştur. Elde edilen bu sapma değeri tüm çözümler içerisindeki en düşük değerdir.

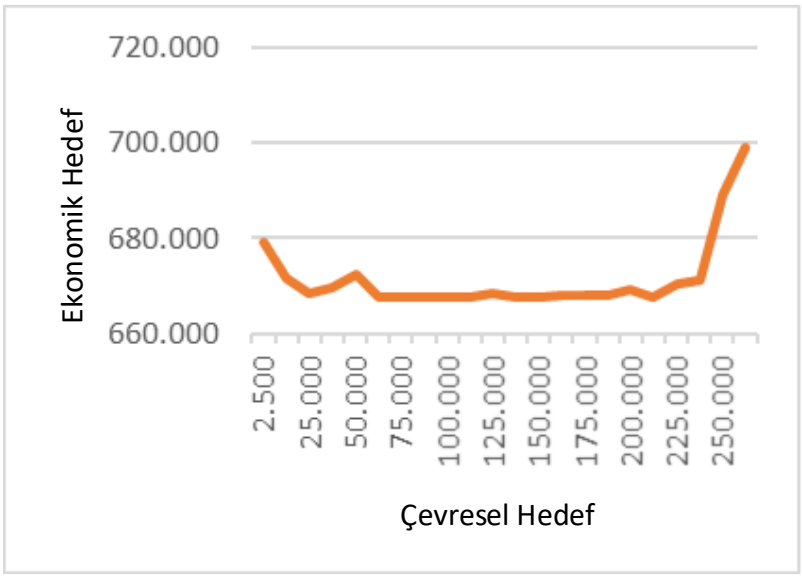
Son olarak, model çevresel hedefe göre çözdürüldüğü zaman emisyon hedefinden gerçekleşen sapma 0 olmaktadır. Ödünleşme çizelgesindeki parametre değerleri dikkate alınarak, AUGMECON-2 (Mavrotas & Floris, 2013) yöntemine göre her bir amaç fonksiyonu için aralık değerleri elde edilmiştir. f_2, f_3 ve f_4 değerleri dikkate alınarak hesaplanan $fmax_i - fmin_i$ aralık değerleri ile uygulanan çözüm neticesinde 60 adet birbirinden farklı Pareto optimal çözüm elde edilmiştir. Bu çözümler Ek-A'da sunulan AUGMECON-2 ile elde edilen Pareto optimal sonuçlar çizelgesinde gösterilmiştir.

Modelin dört farklı hedefi oldugu için, elde edilen sonuçlar her bir hedef tarafından etkilenmektedir. Bu nedenle, modelin iki amaçlı versiyonu kalan diğer iki amaç değeri sabitlenerek çözülmüştür. Böylece, ekonomik hedefin diğer hedefler ile ilişkisi gözlemlenmek istenmiştir. Şekil 5.1'de ekonomik hedef (net maliyet) ve yasal hedef (toplanmayan ürün sayısı) arasındaki ilişki gösterilmektedir. Maliyet düştüğü zaman toplanmayan ürün sayısının doğrusal olmayan şekilde arttığı görülmektedir. Şekil 5.2'de ekonomik hedef ve çevresel hedefin karşılaştırılması görülmektedir. Maliyet değeri (ekonomik hedef) belirli bir çevresel hedef aralığı boyunca sabit kalmaktadır

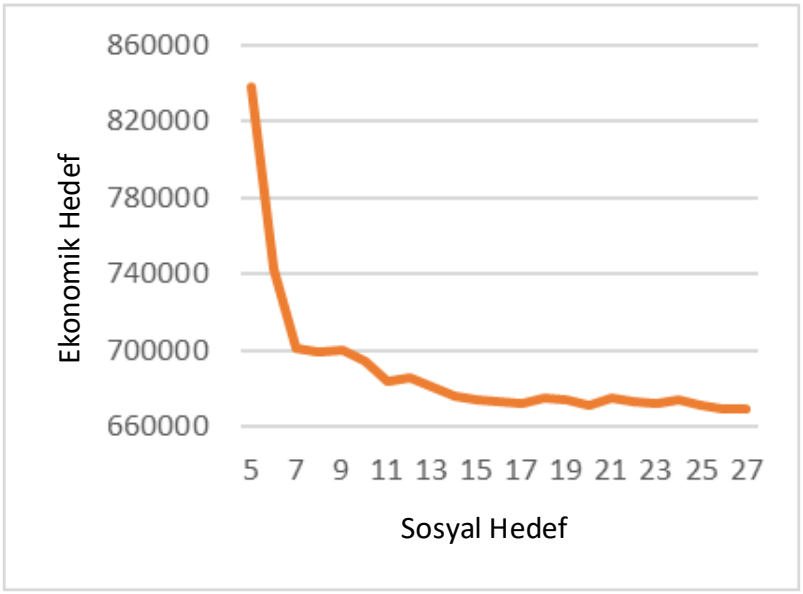
ancak emisyon hedefine çok yaklaşıldığı zaman maliyet yükselmektedir. Öte yandan, emisyon hedefinden çok uzaklaşıldığı zamanda artan ulaştırma ve ürün işleme maliyetlerinin etkisi ile toplam maliyette artış olmaktadır. Şekil 5.3'de ekonomik hedef ve sosyal hedef karşılaştırılmaktadır. Ulaşılabilecek en düşük sosyal hedef değeri olan 5'e yaklaşıldığı zaman maliyetin dramatik bir şekilde arttığı görülmektedir. Sosyal hedeften uzaklaşıldığı zaman ise maliyet kademeli olarak düşmektedir. Belirli bir değerin ardından ise, sosyal hedeften gerçekleşen sapma toplam maliyette yalnızca küçük iyileştirmeler sağlamaktadır.



Şekil 5.1: Toplanmayan ürün adedinin (yasal hedef) ekonomik hedef (net maliyet) üzerine etkisi (çevresel hedef: 102.500, sosyal hedef: 18) (Bal ve Satoğlu, 2018).



Şekil 5.2: Çevresel hedefin ekonomik hedef (net maliyet) üzerine etkisi (yasal hedef: 17.500, sosyal hedef: 18) (Bal ve Satoğlu, 2018).

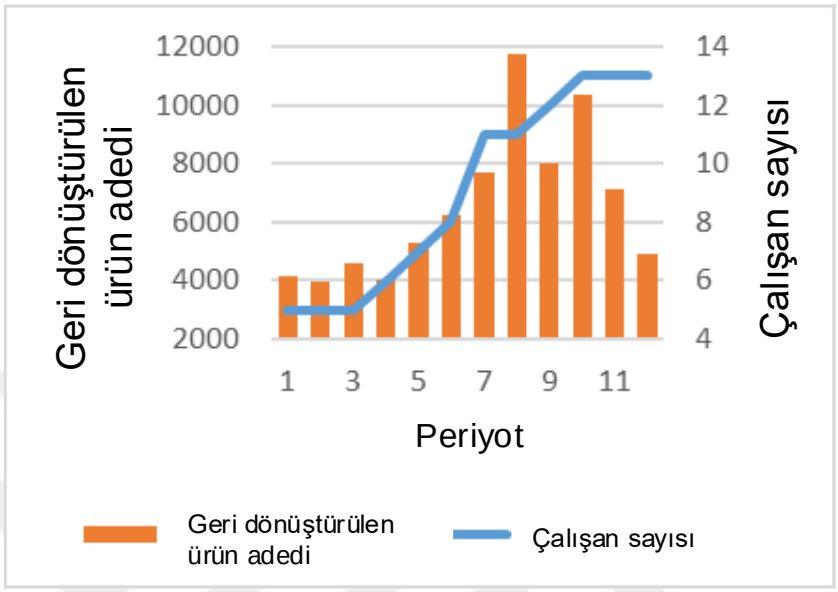


Şekil 5.3: Sosyal hedefin ekonomik hedef (net maliyet) üzerine etkisi (yasal hedef: 17.500, çevresel hedef: 102.500) (Bal ve Satoğlu, 2018).

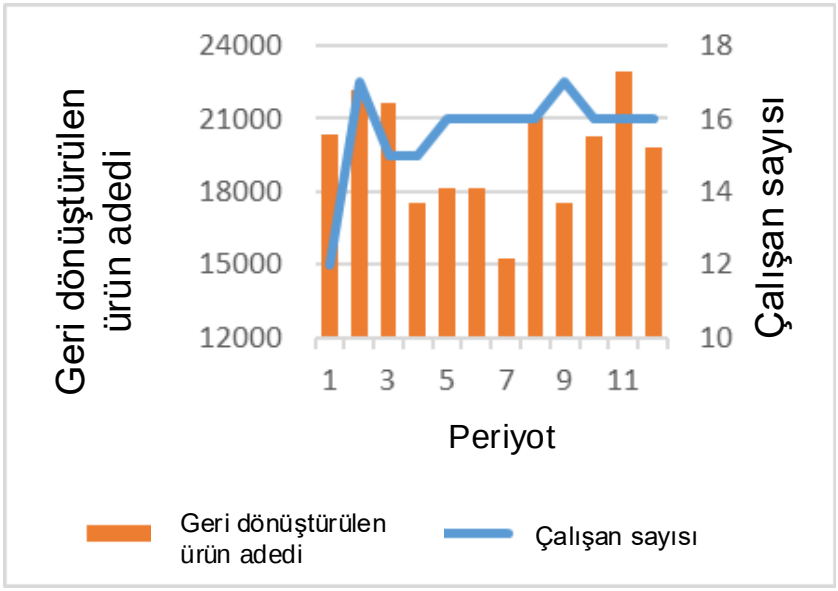
Ek A'daki Pareto optimal sonuç çizelgesi göstermektedir ki çevresel ve sosyal hedefler gözetilerek yasal atık toplama hedefine erişilmek istendiğinde toplam maliyet önemli derecede artış göstermektedir. Örneğin 36. Pareto optimal çözümde toplam maliyet 745.377$ iken toplanmayan atık ürün sayısı 11.072 adet, toplam CO_2 emisyonu değeri 152,355 kg ve toplam çalışan hedefinden gerçekleşen negatif sapma 39 kişi olmuştur. Öte yandan, 48. Pareto optimal çözümde toplanmayan ürün sayısı 10.551, toplam CO_2 emisyonu değeri 155,223 kg ve toplam çalışan hedefinden gerçekleşen negatif sapma 22 kişi olduğunda, toplam maliyet 823.062$ olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca belirtmek gerekir ki bir hedef değeri arttığında veya diğer bir hedef değeri azaldığında toplam maliyet doğrusal olarak değişmemektedir. Bu sebeple, elde edilen Pareto optimal sonuçların uzmanlar ile değerlendirilmesi ve yorumlanması gerekmektedir.

Şekil 5.4 ve 5.5, 15. Pareto optimal çözüm için her bir periyotta (her ay), her iki geri dönüşüm tesisinde çalışan kişi sayısını ve geri dönüştürülen ürün adedini (atık ürün talebi) göstermektedir. İlk tesis yalnızca buzdolabını geri dönüştürmektedir ve talep 8, 9 ve 10. aylarda zirve yapmaktadır (bkz. Şekil 5.4). Şekil 5.4'de görülebileceği üzere geri dönüştürülen buzdolabı adedinin ilk dört ay için her bir ayda yaklaşık olarak 4.000 adet olduğu, 8. ayda ise talebin 12.500 adede ulaştığı görülmektedir. İkinci tesiste ise diğer ürünlerin geri dönüşümü yapılmaktadır. İkinci tesis bir yıl içerisinde 240.000 adet ürünün geri dönüşümünü yapmaktadır. Bu tesis için talep yılın ortasında azalmaktadır ve yılın başında ve sonunda ise önemli derecede artış göstermektedir.

Her iki tesis için de gerçekleşen talep (geri dönüştürülen ürün adedi) büyük değişkenlik göstermesine rağmen, çalışan sayısında meydana gelen değişimin daha düşük olduğu görülmektedir. Sosyal hedef yakalanmak istendiği yani çalışan sayısındaki değişkenlik düşürülmek istendiği için bu durum gerçekleşmektedir.

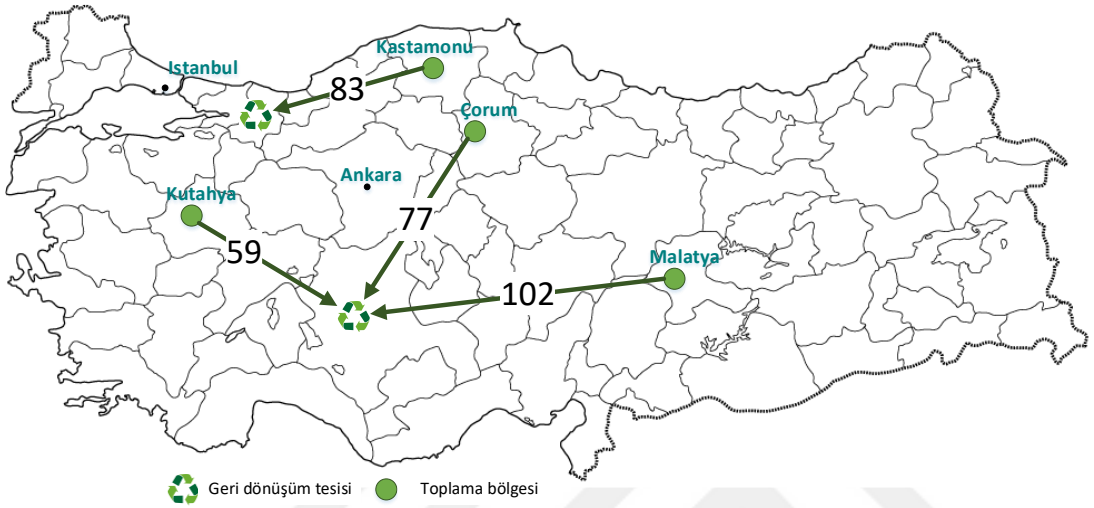


Şekil 5.4: Buzdolabı geri dönüşüm tesisinde her bir periyotta geri dönüştürülen ürün adedindeki ve çalışan sayısındaki değişim (Bal ve Satoğlu, 2018).



Şekil 5.5: Beyaz eşya geri dönüşüm tesisinde her bir periyotta geri dönüştürülen ürün adedindeki ve çalışan sayısındaki değişim (Bal ve Satoğlu, 2018).

Şekil 5.6, 15. Pareto optimal çözüm için 3. periyottaki (Mart ayı) ürün toplama kararını göstermektedir. Buna göre, Kütahya'dan 59 adet buzdolabı, Çorum'dan 77 adet buzdolabı ve Malatya'dan 102 adet buzdolabı, buzdolabı geri dönüşüm tesisine götürülmek için toplanmalıdır. Öte yandan, Kastamonu'dan 83 adet çamaşır makinesi / bulaşık makinesi, beyaz eşya geri dönüşüm tesisine götürülmek üzere Mart ayında (3. periyot) toplanmalıdır.



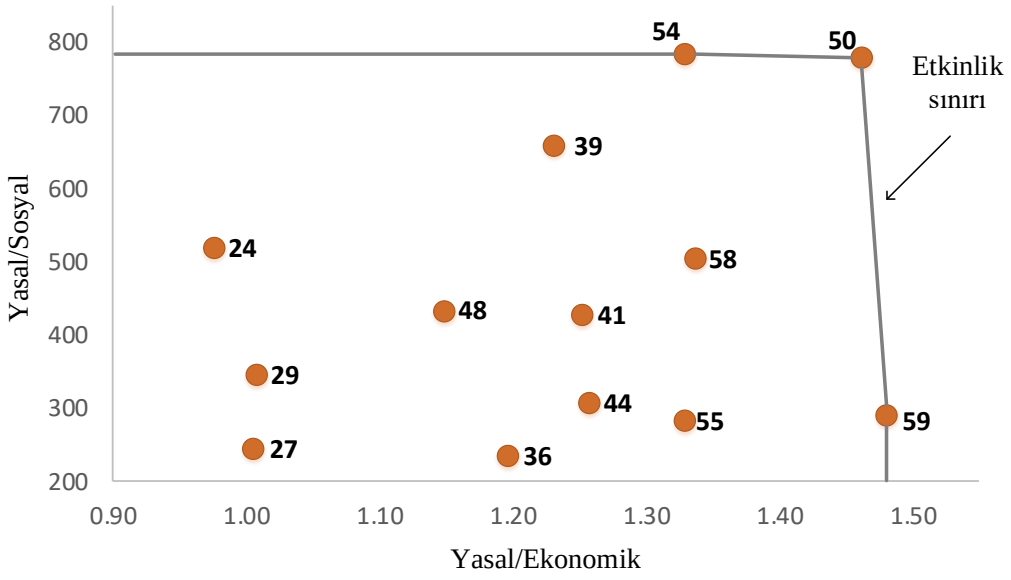
Şekil 5.6: 15. Pareto optimal çözüme göre 3. periyotta şehirlerden toplanacak ürün miktarları (Bal ve Satoğlu, 2018).

5.1 Matematiksel Model Sonuçlarının Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi

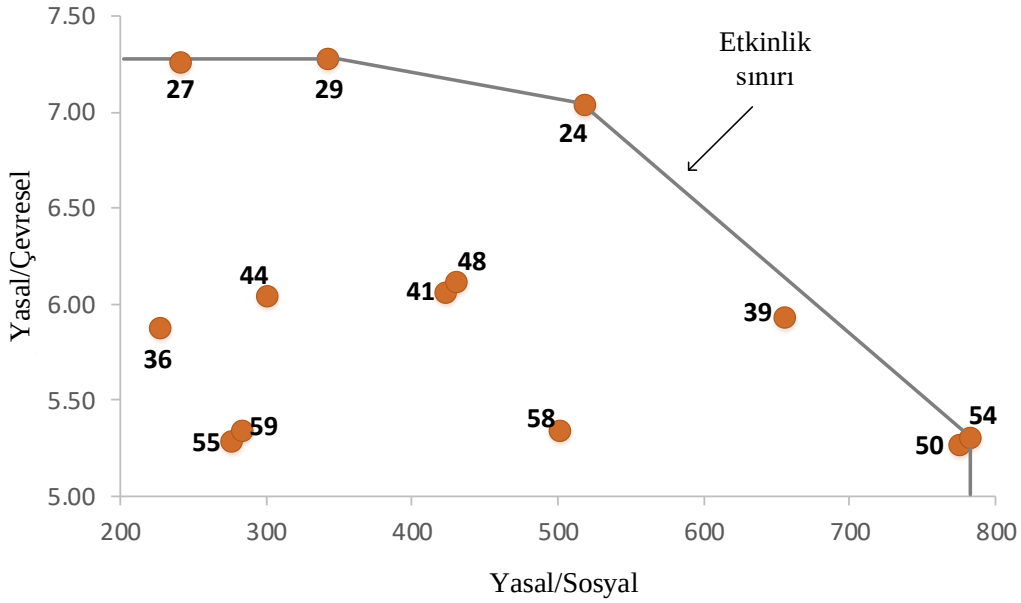
Önerdiğimiz yaklaşımda Veri Zarflama Analizi, karar verme stratejisi olarak elde edilmiş olan Pareto optimal sonuçları değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Pareto optimal sonuçlar, çok amaçlı optimizasyon modelindeki dört amaç (yasal, ekonomik, sosyal, çevresel) için elde edilen çözüm değerlerini göstermektedir. Bu çözüm kümesi içerisinde, diğer amaç değerlerini kötüleştirmeden bir amaç değerini iyileştirmek mümkün değildir. VZA bağlamında, çok amaçlı optimizasyon modelinin amaçları girdi ya da çıktı olarak değerlendirilebilir. Örneğin, her bir Pareto optimal çözüm bir KVB olarak değerlendirilip, en önemli amaç çıktı olarak ve diğer amaçlar girdi olarak kabul edilebilir. Ayrıca, bu uygulamanın dışında diğer çok amaçlı optimizasyon modellerinin Pareto optimal sonuçları dikkate alınarak, girdi ve çıktılar için farklı kombinasyonlar test edilebilir.

5.1.1 Veri zarflama analizi sonuçları

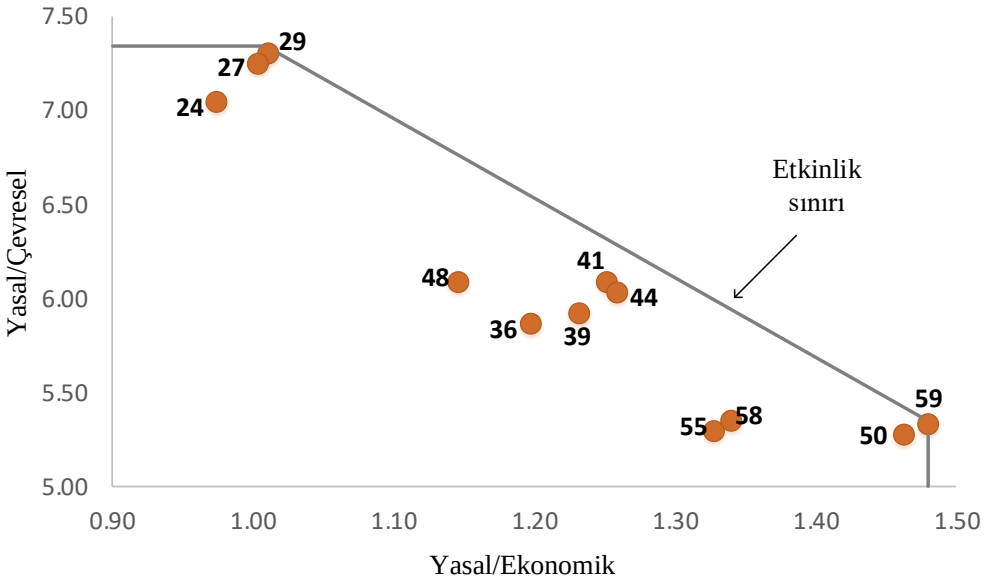
Veri Zarflama Analizi, yasal hedef olan Z1 çıktı kabul edilerek ve Z2 (ekonomik hedef), Z3 (sosyal hedef), Z4 (çevresel hedef) girdi kabul edilerek Pareto optimal sonuçların değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. VZA modeli GAMS® yazılımı ile kodlanmış ve CPLEX çözücüsü kullanılarak çözdürülmüştür. EK-B'de sunulan çizelgede VZA ile sıralanmış 60 adet Pareto optimal sonuç gösterilmiştir. Verimlilik sütunu sınırdaki (verimli olan) çözümü ve diğer çözümlerin göreceli verimliliklerini göstermektedir. Z1, Z2, Z3 ve Z4 sırasıyla, yasal hedef değerini, ekonomik hedef değerini, sosyal hedef değerini ve çevresel hedef değerini göstermektedir. 50 numaralı Pareto optimal çözüm verimli çözüm olarak bulunmuştur. Bu çözümde 9.097 adet toplanmamış ürün, 745.377$ maliyet, sosyal hedeften (çalışan sayısı hedefi) 14 kişilik sapma ve çevresel hedeften (toplam emisyon hedefi) 206.964 kg sapma bulunmaktadır. 59 numaralı Pareto optimal çözüm ikinci en verimli çözüm ($\theta^* = 0{,}996$) olarak bulunmuştur. Bu çözümde toplanmayan ürün sayısı 50 numaralı Pareto optimal çözümdekinden daha düşük ve ekonomik ve çevresel hedef değerleri ise 15 numaralı Pareto optimal çözümdekine eşit olmasına rağmen sosyal hedef değeri 39 kişi olduğu için bu çözüm 50. çözüme kıyasla daha düşük verimlilik değerine sahip olmuştur. VZA sonuçlarından görülmektedir ki toplanmayan ürünlerin toplam sayısı (Z1) verimlilik derecesi düştükçe artış göstermektedir. Ekonomik hedef (Z2) için de benzer bir çıkarım yapmak mümkündür. Çözümlerin verimlilik değeri düştükçe maliyet (ekonomik hedeften sapma) artış göstermektedir. Sosyal hedef için ise durum biraz daha farklıdır. Sosyal hedef değerleri her bir çözüm için yüksek değişkenlik göstermektedir. Ancak, Pareto optimal sonuçların (KVB'lerin) verimlilik değerleri düştükçe sosyal hedeften negatif yönlü sapmaların daha sık olduğu görülmektedir. Öte yandan, yasal hedef (Z1) ve çevresel hedef (Z4) arasında negatif korelasyondan bahsedilebilir. Özellikle en az verimli olan çözümlerde en düşük emisyon değerleri görülmektedir. Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9'da etkinlik sınırı grafikleri 1 çıktı ve 2 girdi durumu için gösterilmiştir. VZA modelinde 1 çıktı ve 3 girdi bulunduğu için etkinlik sınırındaki çözümleri 2 boyutlu olarak gösterebilmek adına farklı kombinasyonlarda etkinlik sınırı grafikleri çizilmiştir.



Şekil 5.7: 1 girdi (yasal hedef) ve 2 çıktı (ekonomik ve sosyal hedefler) için etkinlik sınırı grafiği (Bal ve Satoğlu, 2019).



Şekil 5.8: 1 girdi (yasal hedef) ve 2 çıktı (çevresel ve sosyal hedefler) için etkinlik sınırı grafiği (Bal ve Satoğlu, 2019).



Şekil 5.9: 1 girdi (yasal hedef) ve 2 çıktı (ekonomik ve çevresel hedefler) için etkinlik sınırı grafiği (Bal ve Satoğlu, 2019).

Bu grafiklerde kahverengi noktalar KVB'lerin (Pareto optimal çözümlerin) performansını göstermektedir. Şekil 5.7'de verimli birimler 50, 54 ve 59 numaralı çözümlerdir. Şekil 5.8'deki verimli birimler 24, 29 ve 54 numaralı çözümlerdir. Şekil 5.9'daki verimli birimler ise 29 ve 59 numaralı çözümlerdir. Bu çözümler grafiklerde kalın çizgi ile gösterilen etkinlik sınırı çizgisinin üzerinde bulunmaktadır. Verimsiz birimler (üretim imkan kümesi) bu etkinlik sınırı ile kıyaslanmaktadır. Verimsiz birimlerin verimsiz olmasının sebebi bir birim girdi için elde ettikleri çıktı miktarının etkinlik sınır üzerinde kalan KVB'lerden (çözüm noktalarından) daha düşük kalmasıdır. Verimsiz olan birimler girdilerinde (ekonomik, sosyal ve çevresel hedef değerleri) oransal düşüşler sağlanarak etkinlik sınırına taşınabilir. Şekil 5.7 yasal/sosyal hedef oranını yasal/ekonomik hedef oranı ile kıyaslamaktadır. Şekil 5.8 yasal/çevresel hedef oranını yasal/sosyal hedef oranı ile kıyaslamaktadır. Şekil 5.9 ise yasal/çevresel hedef oranını yasal/ekonomik hedef oranı ile kıyaslamaktadır. Örneğin, şekil 5.7'de 58 numaralı KVB (Pareto optimal çözüm) için KVB 50 ve KVB 59 arasında varsayımsal birleşik birim bulunmaktadır. Yani, KVB 50 ve 59, KVB 58 için akran kümesidir (odak KVB). Akran kümesi KVB 58 için hedef performansı göstermektedir. Girdilerin azaltılması (ekonomik ya da sosyal hedefler) bu karar verme biriminin etkinlik sınırı eğrisine taşınmasını sağlayacaktır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada sürdürülebilir tedarik zinciri için üçlü başarım (TBL) yaklaşımı ile Türkiye örneği için bir tersine tedarik zinciri modeli önerilmiş, mevcut AEEE verileri analiz edilerek kullanıcı tercihleri irdelenmiştir.

Veri analitiği yaklaşımı ile toplanan ömrünü tamamlamış ürün verisi kullanılarak çeşitli analizler yapılmıştır. Böylece, kullanıcıların alışkanlıklarına ve ürün tercihlerine dair çıkarımlar yapılması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile müşterilerin ürün, marka tercihlerine ve bölgesel bazda müşteri alışkanlıklarına dair önemli çıkarımlar yapılmıştır. Ayrıca, toplanan ürün sayısının zaman içerisindeki değişimine bakıldığında mevsimsel değişkenlik olduğu ve yıllık bazda artış trendinin olduğu görülmüştür.

Önerilen optimizasyon modeli ile tersine tedarik zinciri için operasyonel planlama kararları alınmıştır. Modelin uygulaması dayanıklı tüketici ürünleri imal eden bir firma için yapılmıştır. Yönetmelikler ve sürdürülebilirlik boyutları dikkate alınarak hedefler belirlenmiştir. Yönetmeliklere göre, üreticiler ilgili dönemde sattıkları ürün miktarının belirli bir yüzdesi kadar ömrünü tamamlamış ürünü toplamakla yükümlüdürler. Bu nedenle yasal hedef, yönetmeliklerde belirtilen ömrünü tamamlamış ürün toplama hedefini yakalamak olarak belirlenmiştir. Ekonomik olarak sürdürülebilir bir iş yürütmek firmalar için yaşamsal koşullardan bir tanesidir. Bu nedenle, tedarik zinciri faaliyetlerinden zarar etmemek (maliyet hedefi = 0) ekonomik hedef olarak belirlenmiştir. Geri dönüşüm süreçlerinden kar elde edebilmenin oldukça güç olduğu gerçeği dikkate alınarak kar eniyilenmesi yerine maliyet en küçüklenmesi ekonomik hedef olarak belirlenmiştir. Firmaların çalışanlarına karşı olan sorumlulukları düşünüldüğünde ise çalışanlarına sürekli iş imkanı sağlayabilmesi oldukça önemlidir. Özellikle, talebi yoğun değişkenlik gösteren ürünlerde iş gücünü belirli bir düzeyde dengeleyebilmek oldukça zordur. Bu nedenle, talep değişkenlikleri ve tesis kapasiteleri dikkate alınarak sosyal hedef geri dönüşüm tesisleri için her bir periyotta belirli bir çalışan sayısını yakalamak olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda, çevresel sorumluluğu da dikkate alarak tedarik zinciri optimize edilirken emisyon hedefi

belirlenmiştir. Hedef belirli bir seviyedeki emisyon değerini nakliye ve üretim operasyonları neticesinde aşmamak olarak tanımlanmıştır. Böylece, önerilen model üreticileri daha çevreci araç kullanmaya (Euro6 motorlara sahip kamyonlar) ve daha az enerji tüketen üretim operasyonlarını gerçekleştirmeye zorlamaktadır. Önerilen karma tamsayılı doğrusal hedef programlama modelinin çözümü AUGMECON-2 yöntemi ve GAMS® yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Sürdürülebilir tedarik zinciri modelleri genellikle çok amaçlı olarak modellendiği için, VZA analizi çok amaçlı optimizasyon modelinin çözümü ile elde edilmiş olan Pareto optimal sonuçların değerlendirilmesi amacıyla bir karar verme stratejisi olarak kullanılmıştır. Pareto optimal sonuçların değerlendirilmesi hem akademik çalışanlar için hem de sektör çalışanları için oldukça önemlidir. Ancak çok amaçlı optimizasyon modellerinde tek bir sonuç olmadığı ve bir çözüm kümesi olduğu için bu sonuçların açıklanması zorlayıcı olabilmektedir. Her bir çözüm farklı farklı açıklanabileceği gibi sistematik bir yöntem de izlenebilir. Çeşitli kalitatif veya kantitatif yöntemler Pareto optimal çözümlerin değerlendirilmesi için kullanılabilir. Bu bağlamda VZA uygun bir yöntem olarak değerlendirilmiştir. VZA modelinin Pareto optimal sonuçlara uyarlanması ve bu modelin çözümü neticesinde 50 numaralı Pareto optimal çözüm en verimli çözüm olarak bulunmuştur. VZA modeli sonuçlarına bakıldığında genel olarak söylenebilir ki toplanmayan ürün sayısı (Z1) ve toplam maliyet (Z2) azaldıkça çözümler daha verimli hale gelmektedir. Ancak, düşük maliyet ve düşük sayıda toplanmayan ürün elde etmek istendiğinde emisyon değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Bu durum en uygun çözümü seçerken çevresel hedefe karşı yasal ve ekonomik hedefler arasında bir ödünleşme olduğuna işaret etmektedir. Öte yandan, farklı Pareto optimal çözümlerde farklı değerlere sahip sosyal hedef değerleri görülmüştür. VZA en düşük değere sahip olan sosyal hedefi verimli sonuç olarak belirlemiştir. Yani çalışan hedefinden en az sapma gösteren sonuç verimli sonuç olmuştur.

Önerilen optimizasyon modeli tüm elektrikli ve elektronik ürün üreticileri için, otomotiv tedarik endüstrisi için veya sağlık sektörü için uygulanabilecek şekilde geliştirilmiştir. Modelin uygulaması küresel bir beyaz eşya üreticisi için yapılmıştır. Ancak, bazı sektörlerde ömrünü tamamlamış ürünlerin toplanmasına dair yönetmelikler bulunmamaktadır. Bu gibi durumlarda model yasal hedef olmadan

çalıştırılabilir. Ayrıca, ürün yapısı dikkate alınarak ilave çevresel kısıtlar modele eklenebilir.

Ürün talebinde ve geri dönüştürülen malzemelerin fiyatlarında belirsizlikler bulunmaktadır. Bu nedenle gelecek çalışmalarda belirsizlikler dikkate alınarak stokastik optimizasyon teknikleri tedarik zinciri modellemesi için kullanılabilir. Ayrıca farklı tipteki ürünler için planlama yapılabilir ve farklı sosyal hedefler geliştirilebilir. Pareto optimal sonuçların değerlendirilmesi için Veri Zarflama Analizi yöntemi kullanılmıştır. Sonuçların farklı şekilde izah edilebilmesi amacıyla ya da sonuçları değerlendirmek için kullanılan yöntemlerin birbiri ile karşılaştırılabilmesi için farklı çok kriterli karar verme yöntemleri de kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Abreu, A. & Camarinha-Matos, L.M. (2008). On the role of value systems to promote the sustainability of collaborative environments. *International Journal of Production Research 46* (5), 1207e1229.

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

Amin, S. H. & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling, 37*(6), 4165-4176.

Anvari, S. & Türkay, M. (2017). The facility location problem from the perspective of triple bottom line accounting of sustainability. *International Journal of Production Research, 55*(21), 1-22.

Arampantzi, C. & Minis, I. (2017). A new model for designing sustainable supply chain networks and its application to a global manufacturer. *Journal of Cleaner Production, 156*, 276-292.

Aras, N. & Aksen, D. (2008). Locating collection centers for distance-and incentive-dependent returns. *International Journal of Production Economics, 111*(2), 316-333.

Awaysheh, A. & Klassen, R.D. (2010). The impact of supply chain structure on the use of supplier socially responsible practices. *International Journal of Operations & Production Management. 30*, 1246-1268.

Bal, A. ve Satoğlu, Ş.I. (2017). A goal programming model for the WEEE products recovery operations planning. *Proceedings of International Conference on Computers & Industrial Engineering: CIE47.*

Bal, A. ve Satoğlu, Ş. I. (2018). A goal programming model for sustainable reverse logistics operations planning and an application. *Journal of Cleaner Production, 201*, 1081-1091.

Bal, A., Sarvari, P.A. ve Satoğlu, Ş.I. (2018). *Analyzing recycling operations data of white appliances industry in Turkish market.* Industrial Engineering in the Industry 4.0 Era. Springer Science & Business Media.

Bal, A. ve Satoğlu, Ş. I. (2019). The use of Data Envelopment Analysis in evaluating Pareto optimal solutions of the sustainable supply chain models. *Procedia Manufacturing, 33*, 485-492.

Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management science, 30*(9), 1078-1092.

Belton, V. & Vickers, S.P. (1993) Demystifying DEA: a visual interactive approach based on multiple criteria analysis. *Journal of the Operational Research Society*, *44* (1993) 883–896.

Berg, S. (2010). Water Utility Benchmarking: Measurement, Methodology, and Performance Incentives. *International Water Association.*

Bouyssou, D. (1999) Using DEA as a tool for MCDM: some remarks. *Journal of the Operational Research Society*, *50*, 974–978.

Brent, A.C., Rogers, D.E., Ramabitsa-Siimane, T.S., & Rohwer, M.B. (2007). Application of the analytical hierarchy process to establish health care waste management systems that minimise infection risks in developing countries. *European Journal of Operational Research, 181*(1), 403-424.

Carter, C.R. & Rogers, D.S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physıcal Distribution & Logistics Management 38* (5), 360-387.

Castka, P. & Balzarova, M.A. (2008). ISO 26000 and supply chains-On the diffusion of the social responsibility standard. International Journal of Production Economics. *111*, 274-286.

Charnes, A., William W.C., & Edwardo, R. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research 2.6*: 429-444.

Clift, R. (2003). Metrics for supply chain sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy 5* (3-4), 240-247.

Colapinto, C., Jayaraman, R., & Marsiglio, S. (2015). Multi-criteria decision analysis with goal programming in engineering, management and social sciences: a state-of the art review. *Annals of Operations Research 251* (1), 7-40.

Coşkun, S., Özgür, L., Polat, O., ve Güngör, A. (2016). A model proposal for green supply chain network design based on consumer segmentation. *Journal of Cleaner Production 110*, 149-157.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2008). *Elektrikli ve elektronik eşyalarda bazı zararlı maddelerin kullanımının sınırlandırılmasına dair yönetmelik*. Erişim adresi: http:// www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/05/ 20080530-3.htm.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2012). *Atık elektrikli elektronik eşyaların (AEEE) kontrolü yönetmeliği.* Erişim adresi: http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/05/20120522-5.htm

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2015). *Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik*. Erişim adresi: https://cygm.csb.gov.tr/taslaklar-i-443

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

Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K., & van Wassenhove, L.N. (2013). *Reverse Logistics: Quantitative Models for Closed-loop Supply Chains.* Springer Science & Business Media.

Delmas, M. & Montiel, I. (2009). Greening the supply chain: when is customer pressure effective? *Journal of Economics & Management Strategy. 18,* 171-201.

Demirel, N. O. ve Gökçen, H. (2008). A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 39* (11), 1197-1206.

Demirel, E., Demirel, N. ve Gökçen, H. (2016). A mixed integer linear programming model to optimize reverse logistics activities of end-of-life vehicles in Turkey. *Journal of Cleaner Production, 112,* 2101-2113.

Diabat, A., Abdallah, T., Al-Refaie, A., Svetinovic, D., & Govindan, K. (2013). Strategic closed-loop facility location problem with carbon market trading. *IEEE Transactions on Engineering Management, 60* (2), 398-408.

Drake, D.F. & Spinler, S. (2013). Sustainable operations management: an enduring stream or a passing fancy? *Manufacturing & Service Operations Management, 15* (4), 689-700.

European Comission. (2003). Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). joint declaration of the European Parliament, the council and the commission relating to article 9, Official Journal L 037, 13/02/2003, 24-39.

European Comission. (2012). Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). OJEU L 197/38 of 24.07.2012. Erişim adresi: http://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN

Ene, S. ve Öztürk, N. (2015). Network modeling for reverse flows of end-of-life vehicles. *Waste Management, 38,* 284-296.

Ehrgott, M. & Ryan, D.M. (2002). Constructing robust crew schedules with bicriteria optimization. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 11* (3), 139-150.

Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Peton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: an optimization-oriented review. *Omega, 54,* 11-32.

Feitó-Cespón, M., Sarache, W., Piedra-Jimenez, F., & Cespón-Castro, R. (2017). Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty: A case study. *Journal of Cleaner Production, 151,* 206-217.

Fonseca, M. C., García-Sánchez, Á., Ortega-Mier, M., & Saldanha-da-Gama, F. (2010). A stochastic bi-objective location model for strategic reverse logistics. *Top, 18*(1), 158-184.

Ghosh, D. & Shah, J. (2015). Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract. *International Journal of Production Economics, 164*, 319-329.

Golicic, S.L. & Smith, C.D. (2013). A meta-analysis of environmentally sustainable supply chain management practices and firm performance. *Journal of Supply Chain Management*. *49*, 78-95.

Gonela, V., Zhang, J., & Osmani, A. (2015). Stochastic optimization of sustainable industrial symbiosis based hybrid generation bioethanol supply chains. *Computers & Industrial Engineering, 87*, 40-65.

Govindan, K., Jha, P. C., & Garg, K. (2016a). Product recovery optimization in closed-loop supply chain to improve sustainability in manufacturing. *International Journal of Production Research, 54* (5), 1463-1486.

Govindan, K., Paam, P., & Abtahi, A. R. (2016b). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological Indicators, 67*, 753-768.

Gupta, P., Mehlawat, M. K., Aggarwal, U. & Charles, V. (2018). An integrated AHP-DEA multi-objective optimization model for sustainable transportation in mining industry. *Resources Policy*.

Hamacher, H.W., Pedersen, C.R., & Ruzika, S. (2007). Finding representative systems for discrete bicriterion optimization problems. *Operations Research Letters, 35* (3), 336-344.

Hashemi, V., Chen, M., & Fang, L. (2014). Process planning for closed-loop aerospace manufacturing supply chain and environmental impact reduction. *Computers & Industrial Engineering, 75*, 87-95.

Hung Lau, K. & Wang, Y. (2009). Reverse logistics in the electronic industry of China: a case study. *Supply Chain Management: An International Journal, 14* (6), 447-465.

Isermann, H., & Steuer, R. E. (1988). Computational experience concerning payoff tables and minimum criterion values over the efficient set. *European Journal of Operational Research, 33* (1), 91-97.

ISO. (2015). *ISO 14001, Environmental Management Systems.* (Final Draft).

ISO. (2010). *ISO 26000, Guidance on Social Responsibility*. Retrieved from: http://www.uobaghdad.edu.iq/uploads/pics13/qaa/iso26000.pdf.

Jain, A. D. S., Mehta, I., Mitra, J., & Agrawal, S. (2017). Application of big data in supply chain management. *Materials Today: Proceedings, 4* (2), 1106-1115.

Jayal, A. D., Badurdeen, F., Dillon Jr, O. W., & Jawahir, I. S. (2010). Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2* (3), 144-152.

Jeurissen, R. (2000). John Elkington, Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business. *Journal of Business Ethics, 23* (2), 229-231.

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.

Kapukaya, E. N., Bal, A. & Satoğlu, S. I. (2019). A bi-objective model for sustainable logistics and operations planning of WEEE recovery. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA), 9* (2), 89-99.

Kara, S., Rugrungruang, F., & Kaebernick, H. (2007). Simulation modelling of reverse logistics networks. *International Journal of Production Economics, 106* (1), 61-69.

Keshavarz, E., & Mehdi T. (2015) Efficiency status of a feasible solution in the Multi-Objective Integer Linear Programming problems: A DEA methodology. *Applied Mathematical Modelling, 39.12* (2015): 3236-3247.

Kilic, H. S., Cebeci, U. ve 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.

Kleindorfer, P.R., Singhal, K., & Wassenhove, L.N. (2005). Sustainable operations management. *Production and Operations Management, 14* (4), 482-492.

Krumwiede, D.W. & Sheu, C. (2002). A model for reverse logistics entry by third-party providers. *Omega, 30* (5), 325-333.

Kumar, S. & Putnam, V. (2008). Cradle to cradle: reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors. *International Journal of Production Economics, 115* (2), 305-315.

Laumanns, M., Thiele, L., & Zitzler, E. (2006). An efficient, adaptive parameter variation scheme for metaheuristics based on the epsilon-constraint method. *European Journal of Operational Research, 169* (3), 932-942.

Lee, D. H. & Dong, M. (2009). Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 45* (1), 61-71.

Linton, J.D., Klassen, R., & Jayaraman, V. (2007). Sustainable supply chains: an introduction. *Journal of Operations Management, 25* (6), 1075-1082.

Liu, F. H. F., Huang, C. C. & Yen, Y. L. (2000). Using DEA to obtain efficient solutions for multi-objective 0–1 linear programs. *European Journal of Operational Research, 126* (1), 51-68.

Martersson, L. (2010). Emissions from Volvo's trucks. Regulation no: 2064010005. *Volvo Truck Corporation, 1*, 1-5.

Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ε-constraint method in multiobjective mathematical programming problems. *Applied Mathematics and Computation, 213* (2), 455-465.

Mavrotas, G. & Florios, K. (2013). An improved version of the augmented ε-constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied Mathematics and Computation, 219* (18), 9652-9669.

Miettinen, K.M. (1998). *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Boston.

Muhtaroglu, F. C. P., Demir, S., Obali, M. ve Girgin, C. (2013). Business model canvas perspective on big data applications. *In Big Data, 2013 IEEE International Conference* (pp. 32-37). IEEE.

Mutha, A. & Pokharel, S. (2009). Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules. *Computers & Industrial Engineering, 56* (1), 334-346.

Najafi, M., Eshghi, K. & Dullaert, W. (2013). A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 49* (1), 217-249.

Neumüller, C., Kellner, F., Gupta, J.N. & Lasch, R. (2015). Integrating three-dimensional sustainability in distribution centre selection: the process analysis method based analytic network process. *International Journal of Production Research, 53* (2), 409-434.

Öko Institut e.V. (2012), Institute für angewandte Ökologie (Institute for applied Ecology), *Recycling critical raw materials from waste electronic equipment.*

Özceylan, E. & Paksoy, T. (2013). A mixed integer programming model for a closed-loop supply-chain network. *International Journal of Production Research, 51* (3), 718-734.

Özceylan, E., Paksoy, T. & Bektaş, T. (2014). Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 61*, 142-164.

Özkır, V. & Başlıgil, H. (2012). Modelling product-recovery processes in closed-loop supply-chain network design. *International Journal of Production Research, 50* (8), 2218-2233.

Pagell, M. & Shevchenko, A. (2014)**.** Why research in sustainable supply chain management should have no future. *Journal of Supply Chain Management. 50,* 44-55.

Paksoy, T., Özceylan, E. & Weber, G.W. (2010, Haziran). A multi objective model for optimization of a green supply chain network. In: *AIP Conference Proceedings. AIP, 1239* (1), 311-320.

Papadimitriou, C. H. & Yannakakis, M. (2000). On the approximability of trade-offs and optimal access of web sources. *Proceedings 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science* (pp. 86-92). IEEE.

Parajuly, K. & Wenzel, H. (2017). Potential for circular economy in household WEEE management. *Journal of Cleaner Production, 151*, 272-285.

Pati, R. K., Vrat, P. & Kumar, P. (2008). A goal programming model for paper recycling system. *Omega, 36* (3), 405-417.

Ramezani, M., Bashiri, M. & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. *Applied Mathematical Modelling, 37* (1), 328-344.

Ramudhin, A., Chaabane, A. & Paquet, M. (2010). Carbon market sensitive sustainable supply chain network design. *International Journal of Management Science and Engineering Management, 5* (1), 30-38.

Rao, P. & Holt, D. (2005). Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance? *International Journal of Operations & Production Management.* 25, 898-916.

REC Türkiye, (2011). The Regulatory Impact Analysis (RIA) (Yayınlanmamış Teknik Rapor). Ankara.

Reeves, G. R. & Reid, R. C. (1988). Minimum values over the efficient set in multiple objective decision making. *European Journal of Operational Research, 36* (3), 334-338.

Roghanian, E. & Pazhoheshfar, P. (2014). An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment by using genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Systems, 33* (3), 348-356.

Safaei, A. S., Roozbeh, A. & Paydar, M. M. (2017). A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain. *Journal of Cleaner Production, 166*, 1154-1168.

Sarkar, B., Ullah, M. & Kim, N. (2017). Environmental and economic assessment of closed-loop supply chain with remanufacturing and returnable transport items. *Computers & Industrial Engineering, 111*, 148-163.

Sarvari, P. A., Ustundag, A. ve H. Takci (2016). Performance evaluation of different customer segmentation approaches based on RFM and demographics analysis. *Kybernetes, 45* (7), 1129-1157.

Satoğlu, S.I. & Suresh, N.C. (2009). A goal-programming approach for design of hybrid cellular manufacturing systems in dual resource constrained environments. *Computers & Industrial Engineering, 56* (2), 560-575.

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

Seuring, S. & Gold, S. (2013). Sustainability management beyond corporate boundaries: from stakeholders to performance. *Journal of Cleaner* Production, *56*, 1-6.

Shaw, K., Irfan, M., Shankar, R. & Yadav, S. S. (2016). Low carbon chance constrained supply chain network design problem: a Benders decomposition based approach. *Computers & Industrial Engineering, 98*, 483-497.

Shih, L.H. (2001). Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling, 32* (1), 55-72.

Soleimani, H. & Govindan, K. (2014). Reverse logistics network design and planning utilizing conditional value at risk. *European Journal of Operational Research, 237* (2), 487-497.

Steuer, R.E. (1986). *Multiple Criteria Optimization, Theory, Computation and Application.* Krieger, Malabar, FL.

Steuer, R. E. (1997). *Non-fully resolved questions about the efficient/nondominated set.* Multicriteria analysis (pp. 585-589). Springer, Berlin, Heidelberg.

Subulan, K., Taşan, A.S. ve Baykaşoglu, A. (2015a). A fuzzy goal programming model to strategic planning problem of a lead/acid battery closed-loop supply chain. *Journal of Manufacturing Systems, 37*, 243-264.

Subulan, K., Taşan A.S. ve Baykaşoglu, A. (2015b). Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming. *Applied Mathematical Modelling, 39* (9), 2661-2702.

Tseng, S.C. & Hung, S.W. (2014). A strategic decision-making model considering the social costs of carbon dioxide emissions for sustainable supply chain management. *Journal of Environmental Management, 133,* 315-322.

Tuzkaya, G., Gülsün, B. ve Önsel, S. (2011). A methodology for the strategic design of reverse logistics networks and its application in the Turkish white goods industry. *International Journal of Production Research, 49* (15), 4543-4571.

Wang, G., Gunasekaran, A., Ngai E. W. & Papadopoulos, T. (2016). Big data analytics in logistics and supply chain management: Certain investigations for research and applications. *International Journal of Production Economics, 176,* 98-110.

Williams, M. & Minjares, R. (2016). *A Technical Summary of Euro 6/VI Vehicle Emission Standards.* ICCT International Council on Clean Transportation.

Wolf, J. (2014). The relationship between sustainable supply chain management, stakeholder pressure and corporate sustainability performance. *Journal of business ethics*, *119* (3), 317-328.

Yang, X. S. (2014). *Nature-inspired optimization algorithms*. (Vol. 14, pp.197-211). Elsevier.

Yougbaré, J. W. & Teghem, J. (2007). Relationships between Pareto optimality in multi-objective 0–1 linear programming and DEA efficiency. *European journal of operational research*, *183* (2), 608-617.

Yousefi, S., Soltani, R., Saen, R. F. & Pishvaee, M. S. (2017). A robust fuzzy possibilistic programming for a new network GP-DEA model to evaluate sustainable supply chains. *Journal of cleaner production*, *166*, 537-549.

Yu, H. & Solvang, W. D. (2017). A carbon-constrained stochastic optimization model with augmented multi-criteria scenario-based risk-averse solution for reverse logistics network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, *164*, 1248-1267.

Yura, K. (1994). Production scheduling to satisfy worker's preferences for days off and overtime under due-date constraints. International Journal of Production Economics, *33* (1), 265-270.

Zhou, X. & Zhou, Y. (2015). Designing a multi-echelon reverse logistics operation and network: A case study of office paper in Beijing. *Resources, Conservation and Recycling*, *100*, 58-69.

Zitzler, E. & Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *3* (4), 257-271.

Zitzler, E., Thiele, L., Laumanns, M., Fonseca, C. M. & Da Fonseca Grunert, V. (2002). Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review. *TIK-Report*, *139*.

EKLER

EK A: Pareto optimal sonuçlar.
EK B: Sıralanmış Pareto optimal sonuçlar.
EK C: AEEE kategorileri.
EK D: AEEE toplama hedefleri.

EK A: Pareto optimal sonuçlar.

Çizelge A.1: AUGMECON-2 ile elde edilen Pareto optimal sonuçlar.

Deney no	Z1	Z2	Z3	Z4
1	15.377	745.377	39	51.741
2	15.033	978.431	31	51.741
3	14.858	900.747	22	51.741
4	14.858	978.431	22	51.741
5	14.805	823.062	22	51.741
6	14.763	823.062	14	51.741
7	14.722	745.377	14	51.741
8	14.559	900.747	31	51.741
9	14.532	823.062	31	51.734
10	14.521	900.747	14	51.741
11	14.516	978.431	39	51.718
12	14.514	823.062	39	51.741
13	14.496	745.377	22	51.733
14	14.496	978.431	14	51.741
15	14.488	900.747	39	51.741
16	14.485	745.377	31	51.741
17	13.518	823.062	22	103.482
18	13.349	900.747	31	98.190
19	13.349	978.431	31	98.190
20	12.959	900.747	22	103.482
21	12.942	823.062	39	103.482
22	12.839	978.431	22	103.482
23	12.766	745.377	39	103.482
24	12.731	745.377	14	103.482
25	12.566	978.431	14	103.482
26	12.507	823.062	14	103.482
27	12.493	745.377	31	103.482
28	12.484	823.062	31	103.482
29	12.474	745.377	22	103.482

Çizelge A.1 (devam): AUGMECON-2 ile elde edilen Pareto optimal sonuçlar.

30	12.454	900.747	39	103.482
31	12.454	978.431	39	103.482
32	12.443	900.747	14	103.482
33	11.414	823.062	31	154.524
34	11.307	900.747	14	155.223
35	11.219	823.062	14	155.223
36	11.072	745.377	39	152.355
37	10.974	823.062	39	155.223
38	10.866	978.431	22	155.223
39	10.812	745.377	14	155.223
40	10.728	900.747	39	155.223
41	10.649	745.377	22	154.273
42	10.645	900.747	31	155.223
43	10.645	978.431	31	155.223
44	10.625	745.377	31	155.209
45	10.608	900.747	22	154.064
46	10.561	978.431	39	155.223
47	10.56	978.431	14	155.137
48	10.551	823.062	22	155.223
49	9.209	900.747	22	206.471
50	9.097	745.377	14	206.964
51	9.096	978.431	22	205.640
52	9.089	900.747	14	206.964
53	9.089	978.431	14	206.963
54	9.045	823.062	14	206.964
55	9.043	823.062	39	206.964
56	9.043	900.747	31	205.906
57	9.004	900.747	39	206.964
58	8.977	823.062	22	206.964
59	8.967	745.377	39	206.964
60	8.951	978.431	31	206.964

EK B: Sıralanmış Pareto optimal sonuçlar.

Çizelge B.1: Veri Zarflama Analizi ile sıralanmış Pareto optimal sonuçlar.

Deney no	Verimlilik	Z1	Z2	Z3	Z4
50	1,000	9.097	745.377	14	206.964
59	0,996	8.967	745.377	39	206.964
44	0,989	10.625	745.377	31	155.208
41	0,989	10.649	745.377	22	154.272
39	0,969	10.812	745.377	14	155.223
29	0,955	12.474	745.377	22	103.482
58	0,953	8.977	823.062	22	206.964
27	0,952	12.493	745.377	31	103.482
36	0,951	11.072	745.377	39	152.354
48	0,948	10.551	823.062	22	155.223
55	0,947	9.043	823.062	39	206.964
54	0,947	9.045	823.062	14	206.964
24	0,922	12.731	745.377	14	103.482
23	0,918	12.766	745.377	39	103.481
57	0,912	9.004	900.746	39	206.964
56	0,911	9.043	900.746	31	205.905
52	0,905	9.089	900.746	14	206.964
37	0,905	10.974	823.062	39	155.223
45	0,901	10.608	900.746	22	154.064
28	0,898	12.484	823.062	31	103.482
49	0,896	9.209	900.746	22	206.471
42	0,895	10.645	900.746	31	155.223
26	0,895	12.507	823.062	14	103.482
40	0,887	10.728	900.746	39	155.223
60	0,881	8.951	978.431	31	206.964
35	0,881	11.219	823.062	14	155.223
16	0,878	14.485	745.377	31	51.741
13	0,876	14.496	745.377	22	51.733
14	0,872	9.096	978.431	22	205.639

Çizelge B.1 (devam): Veri Zarflama Analizi ile sıralanmış Pareto optimal sonuçlar.

53	0,870	9.089	978.431	14	206.962
47	0,863	10.560	978.431	14	155.136
33	0,863	11.414	823.062	31	154.523
46	0,862	10.561	978.431	39	155.223
43	0,855	10.645	978.431	31	155.223
32	0,853	12.443	900.746	14	103.482
30	0,852	12.454	900.746	39	103.482
21	0,843	12.942	823.062	39	103.482
7	0,840	14.722	745.377	14	51.741
38	0,835	10.866	978.431	22	155.223
34	0,831	11.307	900.746	14	155.223
12	0,810	14.514	823.062	39	51.741
9	0,808	14.532	823.062	31	51.734
31	0,807	12.454	978.431	39	103.482
25	0,795	12.566	978.431	14	103.482
20	0,795	12.959	900.746	22	103.482
17	0,774	13.518	823.062	22	103.482
6	0,774	14.763	823.062	14	51.741
5	0,767	14.805	823.062	22	51.741
22	0,766	12.839	978.431	22	103.482
18	0,765	13.349	900.746	31	98.190
15	0,759	14.488	900.746	39	51.741
10	0,755	14.521	900.746	14	51.740
8	0,750	14.559	900.746	31	51.741
2	0,736	15.377	745.377	39	51.741
19	0,724	13.349	978.431	31	98.190
14	0,711	14.490	978.431	14	51.741
11	0,708	14.516	978.431	39	51.717
3	0,708	14.858	900.746	22	51.741
4	0,664	14.858	978.431	22	51.741
2	0,641	15.033	978.431	31	51.741

EK C: AEEE kategorileri.

Çizelge C.1: Elektrikli ve elektronik eşya kategorileri (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2008).

Kategori no	Kategori ismi
1	Büyük ev eşyaları
2	Küçük ev eşyaları
3	Bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları
4	Tüketici ekipmanları
5	Aydınlatma ekipmanları
6	Elektrikli ve elektronik aletler (büyük ve sabit sanayi aletleri hariç olmak üzere)
7	Oyuncaklar, eğlence ve spor aletleri
8	Tıbbi cihazlar
9	İzleme ve kontrol aletleri
10	Otomatlar

EK D: AEEE toplama hedefleri.

Çizelge D.1: Yıllara göre AEEE toplama hedefi (% yüzde) (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015).

	1. Buzdolabı / Soğutucular / İklimlendirme cihazları	2. Büyük beyaz eşyalar (Buzdolabı / soğutucular / iklimlendirme cihazları hariç)	3. Televizyon ve monitörler	4. Bilişim ve telekomünikasyon ve tüketici ekipmanları (Televizyon ve monitörler hariç)	5. Aydınlatma ekipmanları	6. Küçük ev aletleri, elektrikli ve elektronik aletler, oyuncaklar, spor ve eğlence ekipmanları, izleme ve kontrol aletleri
2016	5,00	4,00	5,00	4,00	0,50	2,00
2017	5,50	4,50	5,50	4,50	1,00	3,00
2018	6,00	5,00	6,00	5,00	1,50	3,50
2019	6,50	5,50	6,50	5,50	2,00	4,00
2020	7,00	6,00	7,00	6,00	2,50	4,50
2021	10,00	8,00	10,00	8,00	3,00	5,00
2022	12,50	10,00	12,50	10,00	3,50	8,00
2023	15,00	12,50	15,00	12,50	5,00	10,00
2024	17,50	15,00	17,50	15,00	6,00	15,00
2025	20,00	17,50	20,00	17,50	7,00	17,50
2026	22,50	20,00	22,50	20,00	10,00	20,00
2027	25,00	25,00	25,00	25,00	15,00	25,00
2028	30,00	30,00	30,00	30,00	25,00	30,00
2029	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
2030	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Alperen BAL

Doğum Tarihi ve Yeri **:** 09.01.1988 Konya

E-posta **:** abal@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2010, Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** **:** 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2011-2017 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalıştı.
- 2017-2018 yılları arasında Yalova Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalıştı.
- 2018-2019 yılları arası University of Kentucky Institute for Sustainable Manufacturing Institute'da araştırmacı olarak çalıştı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR VE SUNUMLAR:

- Kapukaya, E. N., **Bal, A.,** Satoğlu, Ş. I. 2019. A bi-objective model for sustainable logistics and operations planning of WEEE recovery. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA),* 9(2), 89-99.
- **Bal, A.,** Satoğlu, Ş. I. 2018. A goal programming model for sustainable reverse logistics operations planning and an application. *Journal of Cleaner Production, 201,* 1081-1091.
- **Bal, A.,** Satoğlu, Ş. I. 2019. The use of Data Envelopment Analysis in evaluating Pareto optimal solutions of the sustainable supply chain models. *Procedia Manufacturing, 33,* 485-492.

- **Bal, A.,** Satoğlu, Ş. I. 2018. The use of data envelopment analysis in evaluating Pareto optimal solutions of the sustainable supply chain models. *16th Global Conference on Sustainable Manufacturing to be held in Lexington Kentucky, USA on 2nd – 4th October, 2018. Presented by Technische Universität Berlin (TUB) and University of Kentucky (UK)*
- **Bal, A.,** Sarvari, P. A., Satoğlu, Ş. I. 2017. Analyzing Recycling Operations Data of White Appliances Industry in Turkish Market. *Global Joint Conference on Industrial Engineering and Its Application Areas GJCIE.*
- **Bal, A.,** Satoğlu, Ş. I. 2017. A Goal Programming Model For The WEEE Products Recovery Operations Planning. *International Conference on Computers & Industrial Engineering CIE47.*
- **Bal, A.,** Sarvari, P. A., Satoğlu, Ş. I. 2018. Analyzing Recycling Operations Data of White Appliances Industry in Turkish Market. *Industrial Engineering in the Industry 4.0 Era.* Editors: Fethi Çalışır, Hatice Camgoz Akdağ. Springer Science & Business Media.

DİĞER YAYINLAR VE SUNUMLAR:

- **Bal, A.,** Ceylan, C., Taçoğlu, C. 2017. Using value stream mapping and discrete event simulation to improve efficiency of emergency departments. *International Journal of Healthcare Management*, *10* (3), 196-206.
- Kosanoglu, F., **Bal, A.** 2019. Multi-criteria Selection Analysis of the City Buses at Municipal Transportation. In *Industrial Engineering in the Big Data Era* (pp. 89-97). Springer, Cham.
- Buyukozkan, K., **Bal, A.,** Oksuz, M. K., Kapukaya, E. N., Satoglu, S. I. 2019. A Mathematical Model and a Matheuristic for In-Plant Milk-Run Systems Design and Application in White Goods Industry. In *Industrial Engineering in the Big Data Era* (pp. 99-112). Springer, Cham.
- **Bal, A.,** Satoglu, S. I. 2018. Mathematical Optimization Models for the Maintenance Policies in Production Systems. In *Handbook of Research on Applied Optimization Methodologies in Manufacturing Systems* (pp. 252-268). IGI Global.
- **Bal, A.,** Satoglu, S. I. 2018. Advances in Virtual Factory Research and Applications. In *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation* (pp. 235-249). Springer, Cham.
- **Bal, A.,** Budak, A., Durmusoglu, M. B. 2014. A Lean Approach to Process Management in Public Institutions by Applying Value Stream Mapping Techniques. In *Global conference on engineering and technology management (GCETM).*
- **Bal, A.,** Satoglu, S. I. 2014. Maintenance management of production systems with sensors and RFID: a case study. In *Global conference on engineering and technology management (GCETM)* (pp. 82-89).