

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

**KISITLI VERİ VE BELİRSİZLİK ALTINDA ELEKTRONİK
ATIK (E-ATIK) MİKTARLARININ TAHMİN EDİLMESİNE
YÖNELİK MODEL ÖNERİLERİ**

DOKTORA TEZİ

ZEYNEP ÖZSÜT BOĞAR

DENİZLİ, MAYIS- 2023

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



**KISITLI VERİ VE BELİRSİZLİK ALTINDA ELEKTRONİK
ATIK (E-ATIK) MİKTARLARININ TAHMİN EDİLMESİNE
YÖNELİK MODEL ÖNERİLERİ**

DOKTORA TEZİ

ZEYNEP ÖZSÜT BOĞAR

DENİZLİ, MAYIS- 2023

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

ZEYNEP ÖZSÜT BOĞAR

ÖZET

KISITLI VERİ VE BELİRSİZLİK ALTINDA ELEKTRONİK ATIK (E-ATIK) MİKTARLARININ TAHMİN EDİLMESİNE YÖNELİK MODEL ÖNERİLERİ

DOKTORA TEZİ

ZEYNEP ÖZSÜT BOĞAR

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. AŞKİNER GÜNGÖR)

DENİZLİ, MAYIS- 2023

Teknolojik değişim ve gelişimlerle birlikte, elektronik atık (e-atık) oluşumu son yıllarda hızlı bir şekilde artmıştır. Oluşan e-atık miktarının tahmin edilmesi ise e-atık yönetimi için önemli bir konu haline gelmiştir. Ancak e-atık oluşumunun ve ürün ömürlerinin belirsiz yapısı ile kayıtlı e-atık verilerin sınırlı olması ise e-atık tahminini zorlaştırmaktadır. Bu tez kapsamında e-atık tahmini için üç farklı metodolojik yaklaşım sunulmuştur. İlk olarak girdi-çıkı analizine dayalı Geliştirilmiş Carnegie Mellon (GCM) yöntemi önerilmiştir. Bu modelde e-atık tahmini, klasik Carnegie Mellon yönteminin aksine ürün ömrünün ürünün satış yılına göre farklı olma durumu dikkate alınarak yapılmaktadır. İkinci olarak ise, e-atık tahmini için sistematik bir tahmin yaklaşımı önerilmiş, bu yaklaşım Türkiye'nin 2001-2035 yılları atık cep telefonu (ACT) tahmininde uygulanmıştır. Önerilen yaklaşım, satış verileri ve dinamik ürün ömrünü dikkate almakta, gelecek tahmini yaparken alternatif zaman serisi modellerini (Basit üstel düzeltme, Holt's, Lojistik, Gompertz, Logaritmik, Bass ve ARIMA modelleri) kullanarak en iyi performans sergileyen modeli seçmektedir. Devamında ise atık malzeme miktarları ve getiri potansiyelleri hesaplanmaktadır. Önerilen yaklaşım ile 2035 yılında Türkiye'de ACT miktarının 11,5 milyon adedi geçeceği ve 52 milyon dolarlık bir getiri potansiyeline sahip olacağı tahmin edilmiştir. Üçüncü olarak ise, e-atık tahmini için Trigonometri Tabanlı Ayrık Gri Model (TBDGM (1,1)) önerilmiştir. Önerilen model doğrusal olmayan veri yapısına sahip e-atık oluşumunu trigonometrik ifadelerle modelleyebilme ve model parametrelerini meta sezgisel algoritma ile optimize etme kabiliyeti sayesinde başarılı sonuçlar üretmiştir. TBDGM (1,1) modeli ile Türkiye e-atık oluşumu modellenerek 2021-2030 yılları için e-atık miktarı tahmin edilmiştir. Sonuç olarak, tez kapsamında önerilen modeller ve yaklaşımların, e-atık yönetim sürecinde yer alan tüm paydaşlara stratejik ve taktiksel seviye kararlarda katkı sağlaması beklenmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Atık elektrikli ve elektronik eşya, e-atık, tahmin, modelleme, gri model, malzeme analizi, döngüsel ekonomi

ABSTRACT

PROPOSED ESTIMATION MODELS FOR ELECTRONIC WASTE (E-WASTE) QUANTITIES UNDER LIMITED DATA AND UNCERTAINTY

PH. D THESIS

ZEYNEP ÖZSÛT BOĞAR

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

INDUSTRIAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. AŐKINER GÜNGÖR)

DENİZLİ, MAY 2023

Along with technological changes and developments, electronic waste (e-waste) generation has increased rapidly in recent years. Therefore, estimating the amount of e-waste generation has become essential for e-waste management. However, the uncertainty of e-waste generation and product lifespans and the limited e-waste data make e-waste estimation difficult. Three different methodological approaches are presented for e-waste estimation with the scope of this thesis: First, the Improved Carnegie Mellon (GCM) method based on input-output analysis is proposed. In this model, e-waste estimation is modelled by considering the product lifespan is variable according to the sales year of the product, unlike the classical Carnegie Mellon method. Secondly, a systematic forecasting approach is proposed for e-waste generation, and this approach is applied in Turkey's waste mobile phone (ACT) estimation and forecasting for 2001-2035. The proposed approach considers sales data and dynamic product lifespan and selects the best-performing model using alternative time series models while forecasting. Subsequently, material quantities and revenue potentials are calculated. With the proposed approach, it is forecasted that the amount of ACT to be generated in Turkey will exceed 11.5 million and have a revenue potential of fifty-two million dollars in 2035. Thirdly, Trigonometry Based Discrete Grey Model (TBDGM(1,1)) is proposed for e-waste estimation. The proposed model generated successful results thanks to its ability to model the e-waste generation with nonlinear data structure with trigonometric expressions and to optimize the model parameters with a metaheuristic algorithm. Using this model, Turkey's e-waste generation is modelled, and the amount of e-waste generation is forecasted for 2021-2030. As a result, it is expected that the proposed models and approaches within the scope of the thesis will contribute to all stakeholders involved in the e-waste management process in strategic and tactical level decisions.

KEYWORDS: Waste electrical and electronic equipment, e-waste, forecasting, modelling, grey model, material analysis, circular economy

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vi
KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Motivasyon ve Tezin Önemi	4
1.2 Araştırma Kapsamı ve Amaçlar	6
1.3 Tezin Organizasyonu	8
2. LİTERATÜR	9
2.1 Yöntemler Açısından Literatür Analizi ve Eksiklikler.....	24
2.2 Döngüsel Ekonomi Penceresinden E-atık Tahmin Literatürü.....	30
2.3 Türkiye’de E-atık Tahmin Çalışmaları ve Döngüsel Ekonomi.....	31
3. LİTERATÜRDE MEVCUT E-ATIK TAHMİN MODELLERİ	33
3.1 Satış Yöntemi (The Sales Method).....	33
3.2 Pazar Tedarik-Basit Gecikme Yöntemi (Market Supply- Simple Delay Method)	34
3.3 Dağılımlı Gecikme Yöntemi (The Distribution Delay Method).....	35
3.4 Carnegie Mellon Yöntemi	36
3.5 Zaman Adımı Yöntemi (The Time Step Method).....	43
3.6 Tüketim ve Kullanım Yöntemi (The Consumption and Use Method).....	44
3.7 Genel Amaçlı Tahmin Modelleri.....	45
3.8 Literatürde ve Uygulamada E-atık Tahmininde Kullanılan Yöntemlerin Tartışılması.....	45
4. MATERYAL VE YÖNTEM	47
5. GELİŞTİRİLMİŞ CARNEGIE MELLON (GCM) YÖNTEMİ	50
6. E-ATIK TAHMİNİ İÇİN SİSTEMATİK BİR TAHMİN YAKLAŞIMI VE TÜRKİYE’DE ATIK CEP TELEFONU (ACT) TAHMİNİ UYGULAMASI	57
6.1 Sistem Sınırları	57
6.2 E-atık Oluşumunun Tahmini	59
6.3 E-atık Oluşumunun Gelecek Tahmini	62
6.3.1 Üstel Düzeltme Yöntemleri	63
6.3.2 Büyüme Modelleri	64
6.3.3 Oto regresif Modeller	65
6.4 Tahminleri Değerlendirme ve Yöntem Seçimi	66
6.5 Malzeme Analizi	67
6.6 Hesaplamalı Sonuçlar ve Tartışmalar.....	70
6.6.1 Oluşan E-atık Miktarının Tahmini.....	70
6.6.2 Yöntem Seçimi ve Gelecek Tahmini	71
6.6.3 Malzeme Analizi Sonuçları	72
6.6.4 Duyarlılık Analizi	75
6.6.5 Sonuçların Tartışılması ve Diğer Tartışma Konuları.....	79

6.7	Sistematik Hibrit Tahmin Yaklaşımı – Genel Sonuçlar	84
7.	E-ATIK TAHMİNİ İÇİN TRİGOMETRİ TABANLI AYRIK GRI MODEL VE TÜRKİYE UYGULAMASI.....	88
7.1	Gri Modellere Genel Bakış.....	89
7.1.1	Gri Model (Grey Model, GM(1,1))	89
7.1.2	Ayrık Gri Model (Discrete Grey Model, DGM(1,1)).....	91
7.2	Tez Kapsamında Önerilen TBDGM(1,1) Modeli	93
7.3	TBDGM(1,1) Modelinin Parametre Kestirimi	94
7.4	Sistem Sınırları	96
7.5	E-atık Oluşumunun Tahmini	98
7.5.1	Karşılaştırmalı Analizler	99
7.5.2	E-atık Oluşumunun Gelecek Tahmini	101
7.6	TBDGM(1,1) ile Türkiye E-atık Miktarının Tahmini	102
7.7	TBDGM(1,1)- Sonuçlar ve Tartışma	104
8.	SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR.....	106
8.1	Katkıların Özetlenmesi	106
8.2	Araştırma Alanları ve Gelecek Çalışmalar	108
9.	KAYNAKLAR.....	110
10.	EKLER.....	123
11.	ÖZGEÇMİŞ.....	134

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: AEEE yönetmeliği uygulanan ülke sayıları.....	2
Şekil 1.2: Yıllara göre AEEE işleme tesisi sayılarının değişimi.....	3
Şekil 1.3: İllere göre AEEE işleme tesisi sayısı.....	4
Şekil 1.4: Tez kapsamında yayınlanan makalenin (Ozsut Bogar ve Gungor 2023) erişim sayısı (10.05.2023).....	6
Şekil 2.1: Tahmin yöntemleri literatür özeti	25
Şekil 3.1: CM yönteminde ürün yaşam sonu evreleri (Matthews ve diğ. 1997).....	37
Şekil 3.2: CM yöntemi ve ürün yaşam sonu evrelerine göre ayrışmalar (Peralta ve Fontanos 2006).....	37
Şekil 6.1: Yapılan çalışmanın sistem sınırları.....	58
Şekil 6.2: PDF ve CDF eğrileri ($\alpha=1.52$ ve $\beta=5.62$).....	62
Şekil 6.3: DD yöntemi kullanılarak 2001–2020 için tahmin edilen ACT miktarları	70
Şekil 6.4: DD ve Holt's yöntemleri kullanılarak tahmin edilen ACT miktarları	72
Şekil 6.5: Ton cinsinden atık malzeme miktarları	73
Şekil 6.6: Ton cinsinden kıymetli malzeme miktarları	73
Şekil 6.7: Atık malzemelerin getiri potansiyelleri	74
Şekil 6.8: (a) Kıymetli ve diğer malzemeler için toplam getiri potansiyeli; (b) değerli malzemeler için getiri potansiyeli	75
Şekil 6.9: Farklı ürün ömürleri için 2001-2020 yıllarında oluşan ACT miktarları	77
Şekil 6.10: Farklı ürün ömürlerine göre oluşacak olan ACT miktarları	78
Şekil 6.11: (a) Abone sayısı; (b) abonelerin yüzde dağılımı.....	81
Şekil 6.12: Paranın zaman değerine dayalı potansiyel getiri miktarları	83
Şekil 7.1: (a) Ham veri seti ($x^{(0)}$); (b) Birikimli veri seti ($x^{(1)}$)	90
Şekil 7.2: TBDGM(1,1) ve DGM(1,1) modelleri arasındaki ilişki.....	94
Şekil 7.3: TBDGM(1,1) akış şeması.....	98
Şekil 7.4: (a) DGM(1,1) ve (b) TBDGM(1,1) modelleri ile elde edilen sonuçlar	101

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar	10
Tablo 2.2: UNUKEY kodları ve açıklamaları.....	22
Tablo 2.3: GM kullanan e-atık tahmin çalışmaları	27
Tablo 2.4: Türkiye e-atık tahmini literatürü.....	32
Tablo 3.1: A ürünü için satış verileri ($\times 10^3$ adet/yıl)	33
Tablo 3.2: A ürünü için Satış Yöntemi ile elde edilen sonuçlar ($\times 10^3$ adet/yıl)	34
Tablo 3.3: A ürünü için Basit Gecikme yöntemi ile elde edilen sonuçlar ($\times 10^3$ adet/yıl)	35
Tablo 3.4: A ürününe ait ürün ömür dağılımı	35
Tablo 3.5: Dağılımlı Gecikme Yöntemi ile elde edilen sonuçlar ($\times 10^3$ adet)...	36
Tablo 3.6: CM yöntemi ile farklı satış yıllarına ait e-atık oluşumu.....	39
Tablo 3.7: Eskiye ürünlerin farklı yaşam evrelerine göre ayrışma yüzdeleri (Peralta ve Fontanos 2006).....	40
Tablo 3.8: A ürününe ait Carnegie Mellon yöntemine göre ayrışma miktarları	41
Tablo 3.9: A ürünü için farklı yaşam evrelerine göre oluşan e-atık ve ayrışma miktarları ($\times 10^3$ Adet)	42
Tablo 3.10: B ürününe ait satış ve stok verileri	43
Tablo 3.11: B ürününe ait Zaman Adımı Yöntemi ile elde edilen sonuçlar (Adet/yıl)	43
Tablo 3.12: B ürünü için Tüketim ve Kullanım Yöntemi ile oluşan e-atık miktarları (Adet/yıl)	44
Tablo 4.1: Tez kapsamında önerilen yöntem ve yaklaşımlar.....	49
Tablo 5.1: GCM yöntemi ile farklı satış yıllarına ait e-atık oluşumu	53
Tablo 5.2: Yıllara göre GCM için güncellenen ürün ömürleri Peralta ve Fontanos (2006)'tan uyarlanan)	54
Tablo 5.3: Önerilen GCM yöntemine göre e-atık tahmin sonuçları	55
Tablo 6.4: Önerilen yaklaşımın algoritması	59
Tablo 6.1: Cep telefonu satış verileri (yıl/adet)	61
Tablo 6.2: Tahmin değerlendirme algoritması ve projeksiyon için yöntem seçimi	67
Tablo 6.3: Malzeme analizi algoritması.....	68
Tablo 6.4: Cep telefonlarının içerdiği malzeme yoğunlukları ve ekonomik değerleri.....	69
Tablo 6.5: Yöntemlere ait modelleme hata değerleri.....	71
Tablo 6.6: Ürün ömründeki değişimlerin çıktılara etkisi	77
Tablo 6.7: Bir cep telefonundaki her bir malzeme miktarının %1 değişiminin etkisi	79
Tablo 6.8: Bir cep telefonu için her bir malzeme fiyatının %1 değişiminin etkisi	79
Tablo 6.9: 2020 yılı için farklı ülkelerde oluşan ACT miktarları	83

Tablo 7.1: Washington eyaletinde oluşan e-atık miktarı (Duman ve diğ. 2019).....	97
Tablo 7.2: Washington Eyaleti veri kümesi ile elde edilen tahmin değerleri ...	99
Tablo 7.3: Modellerin eğitim ve test performans değerleri.....	100
Tablo 7.4: 2003-2015 yılları için modellerin performansı.....	100
Tablo 7.5: Modellerin eğitim ve test performans değerlerinin literatür ile karşılaştırılması	100
Tablo 7.6: 2003-2015 yılları için modellerin performansının literatür ile karşılaştırılması	101
Tablo 7.7: 2016-2025 yılları için tahmin edilen e-atık miktarları.....	102
Tablo 7.8: Beyan edilen e-atık miktarları	103
Tablo 7.9: Eğitim (2013-2018) ve test performans değerleri.....	103
Tablo 7.10: Eğitim (2013-2019) ve test performans değerleri.....	104
Tablo 7.11: TBDGM(1,1) ile elde edilen Türkiye e-atık tahmin sonuçları	104

KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ

ACT	: Atık Cep Telefonu
AEEE	: Atık Elektrik Elektronik Ekipmanlar
C&U	: Consumption and Use Method (Tüketim ve Kullanım Yöntemi)
CM	: Carnegie Mellon
DD	: Distribution Delay (Dağılımlı Gecikme)
DE	: Döngüsel Ekonomi
DGM	: Discrete Grey Model (Ayrık Gri Model)
E-atık	: Elektronik atık
EEE	: Elektrikli ve Elektronik Eşyalar
GCM	: Geliştirilmiş Carnegie Mellon
GM	: Gri Model
IOA	: Input-Output Analysis (Girdi-Çıktı Analizi)
LM	: Lojistik Model
MFA	: Material Flow Analysis (Malzeme Akış Analizi)
SD	: Simple Delay Method (Basit Gecikme)
SM	: Sales Method (Satış Yöntemi)
SSL	: Sales-Stock-Lifespan (Satış-Stok-Ürün ömrü)
TBDGM	: Trigonometry Based Discrete Grey Model (Trigonometri Tabanlı Ayrık Gri Model)
TS	: Time Step Method (Zaman Adımı)
ZS	: Zaman Serisi

ÖNSÖZ

İlk teşekkürü, 2014 yılının şubat ayında akademik kariyerime başladığım ilk günden bu yana tüm yapıcılığı, sorgulayıcı yaklaşımı ve vizyonuyla her türlü birikiminden istifade etme şansı yakaladığım, sonrasında çıktığımız doktora yolculuğunda bana bu tez konusunu hediye eden, tüm süreçte beni anlayışla karşılayıp motivasyon dozumu eksik etmeyen ve karşımda, önümde ya da arkamda değil hep yanımda destek verdiğini hissettiğim danışman hocam Prof. Dr. Aşkner GÜNGÖR'e etmek istiyorum.

Tez izleme komitesi üyelerim Doç. Dr. Mehmet Ali ILGIN ve Doç. Dr. Olcay POLAT'a, tezimin gelişimi için verdikleri destek, ayırdıkları zaman ve kattıkları dinamizm için teşekkür ederim. Doktora tez savunmamda yer alma nezaketini gösteren Prof. Dr. Hasan Kıvanç AKSOY'a, aynı bölümde olmaktan her zaman keyif aldığım ve doktora tez savunmamda bulunmasından büyük mutluluk duyduğum Doç. Dr. Hacer GÜNER GÖREN'e kıymetli katkıları için teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez sürecinde akademik çalışmalar yaptığım Dr. Öğr. Üyesi Leyla ÖZGÜR POLAT'a ve yardımsever arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Ozan ÇAPRAZ'a teşekkür ederim. Mesai arkadaşı olarak başladığımız ancak mutluluk ve acılarımızı çokça paylaştığımız Dr. Yusuf YILMAZ başta olmak üzere tüm araştırma görevlisi arkadaşlarım, hocalarım ve bu süreçte sosyalleşme ilacım olan tüm yemek ve kahve arkadaşlarım iyi ki varsınız.

İlk öğretmenim sevgili Ahmet Faik MÜLAYİM başta olmak üzere eğitimim boyunca hayatıma dokunan tüm öğretmenlerim ve üniversite hocalarıma ve en çok da başöğretmenim Mustafa Kemal ATATÜRK'e, mühendis bir kadın akademisyen olma yolunda bana bu aydınlık dünyanın kapılarını açtıkları için minnettarım.

Ve beni bugünlere getiren sevgili aileme, abim Mustafa Özgür ÖZSÜT'e, ablam Fatma Devrim ERCAN'a, eşlerine ve yeğenlerime teşekkürlerimi dile getirecek sözcükleri bulamadığım için çokça sarılıyorum.

Bu doktora tezini uzun soluklu bir serüvene dönüştüren canımın içleri kızım Asya BOĞAR'a ve oğlum Ardiç BOĞAR'a bu tezi hatıra olarak bırakmaktan büyük keyif duyuyorum. Sevgili ablamız Leyla ÜNAL ve ailesine bu süreçte çocuklarımızı büyütürken verdikleri destek için teşekkür ederim. Son olarak, soğuk bir Eskişehir kışında öğrenci olarak çıktığımız yolda sevgili, akademisyen, eş ve ebeveyn olma şansı yakaladığımız Eşref BOĞAR'a teşekkürlerin en büyüğünü ediyorum.

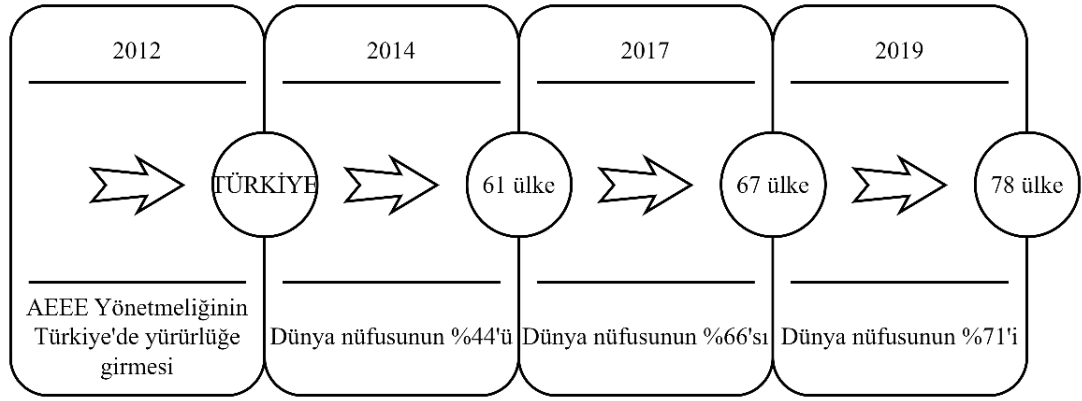
Bu doktora tezini canım anneme ve bir gün tekrar buluşacağımıza inandığım sevgili babacığma ithaf ediyorum...

Zeynep Özsüt Boğar
Denizli, Mayıs, 2023

1. GİRİŞ

Elektrikli ve elektronik eşyalar (EEE) her geçen gün hayatımızın farklı noktalarında daha yaygın kullanılmaktadır. Başlangıçta aydınlatma ve beyaz eşyalarla evlere giren EEE'ler, günümüzde bilgisayar, cep telefonu gibi bilgi teknolojileri ürünleri ve küçük ev aletleriyle ev ve iş yaşamının vazgeçilmez öğeleri olmuşlardır. Ayrıca geleneksel üretim sistemlerinin yanı sıra Endüstri 4.0'a dayalı sistemler, tıbbi cihazlar, insanlı ve insansız ulaşım sistemleri, enerji üretim sistemleri, savunma ve uzay teknolojileri gibi hayatın her alanında EEE'ler etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Clarke ve diğ. 2019; Shittu ve diğ. 2021; Zhang ve diğ. 2017). Bu ürünlerin kullanım alanının genişlemesi ve teknolojik değişimlerin hızlı yol kat ediyor olması ise beraberinde hızlı bir atık elektrikli ve elektronik eşya (AEEE) / elektronik atık (e-atık) oluşumunu getirmektedir. E-atıklar ürünün işlevini ve ömrünü tamamlaması nedeniyle zorunlu haller nedeniyle, yeni bir modelinin piyasaya sürülmesi nedeniyle ya da kullanıcıların kullandıkları ürünü değiştirmesine bağlı olarak tercihen de oluşabilmektedir.

Küresel E-atık İzleme Raporu'na göre 2014 yılında 44,7 milyon ton, 2019 yılında 53,6 milyon ton e-atık oluştuğu, 2030 yılında ise oluşacak olan e-atık miktarının 74,7 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmiştir (Forti ve diğ. 2020). Oluşan ve oluşması potansiyel e-atık miktarının doğru tahmin edilmesi ise oldukça zordur. Dünyada yasa ve yönetmeliklerle kontrolü ve takibi yapılan AEEE'ler için, bu düzenlemeleri yürürlüğe alan ülkelerin sayısı Şekil 1.1'de verildiği gibi her ne kadar zamanla artıyor olsa da hala yeterli seviyede değildir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde kullanılan ürün sayıları artış göstermektedir ancak bu ürünlere ait verilerin sistematik ve düzenli bir şekilde kayıt altında olmayışı, kullanım sonrası oluşan e-atıkların akıbetinin belirsizliği, kayıt dışı geri dönüşüm faaliyetleri, ikinci el elektronik ürün ithalatı-ihracatı gibi farklı zorluklar nedeniyle oluşan e-atık miktarının tahmini ve yapılan tahminlerin doğruluğunun sınanması oldukça güçtür.

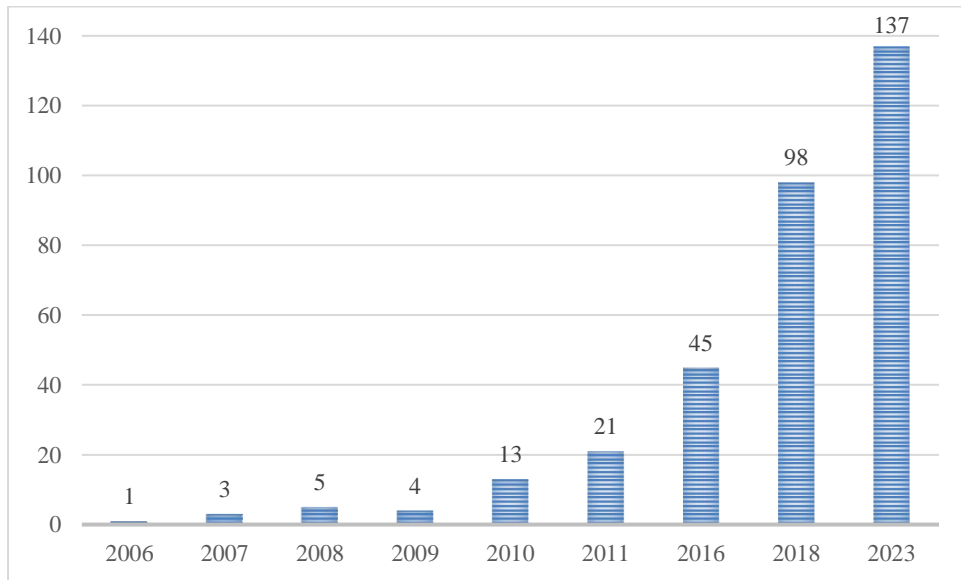


Şekil 1.1: AEEE yönetmeliği uygulanan ülke sayıları

Oluşan e-atık türlerine bakıldığında ise, cep telefonu, televizyon ve bilgisayarların teknolojik değişimlere bağlı olarak en hızlı ve yüksek miktarda atık oluşturan ürünler olduğu görülmektedir. Dünya çapında 2019 yılında tüm e-atık kategorileri içinde en büyük e-atık hacmine sahip büyük ev eşyaları (buzdolabı, çamaşır makinesi vb.) kategorisinde 13,1 milyon ton atık oluşmuşken, küçük bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları 4,7 milyon ton atık oluşmuştur (Forti ve diğ. 2020). Burada çarpıcı olan, büyük ev eşyaları kategorisinde oluşan e-atık miktarı küçük bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları kategorisinin kütlece 2,8 katıdır. Ancak bir adet cep telefonunun yaklaşık 100 gram, bir çamaşır makinesinin ise yaklaşık 65 kg olduğu dikkate alındığında, cep telefonlarının oluşan e-atık miktarına adet bakımından katkısının büyük olduğu ortadadır. E-atıklar aynı zamanda döngüsel ekonomiye (DE) katkıda bulunma konusunda yüksek bir potansiyele sahiptir. DE, sürdürülebilirlik için ekonomik bir modeldir (Pan ve diğ. 2022). Stahel'e göre (Stahel 2016), "4R" DE stratejileri baskın ekonomik mantıktan sapmaktadır ve stratejiler yeniden kullanım, geri dönüşüm, onarım ve yeniden üretimdir. DE'ye geçiş için mevzuat ve iş stratejileri oluşturulurken, mal ve hizmetlerin DE'ye katkısının ölçülmesi esastır (Corona ve diğ. 2019). Bu terimler doğrudan e-atık yönetimi konularını göstermektedir. Bu nedenle DE, EEE pazarı ve AEEE endüstrisi için büyük bir öneme sahiptir. E-atıklar ve özellikle cep telefonları içerdikleri kıymetli madenler ve malzemeler (altın, gümüş, paladyum, plastik vb.) yönüyle, geri dönüşüm ve malzeme geri kazanımı noktasında DE'ye katkı sağlama potansiyeline sahiptir. Diğer yandan ise, cıva, kadmiyum ve kurşun gibi ağır metaller, kloroflorokarbonlar (CFC'ler), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC'ler) gibi kimyasallar ve alev geciktiriciler gibi zararlı kirleticilerin mevcut olduğu e-atıkların uygun olmayan ve kontrolsüz koşullarda taşınması, depolanması,

sökülmesi ve geri kazanım sürecine sokulması telafisi olmayacak seviyede tehlikelidir. Bu malzemelerin solunum ve temas yoluyla vücuda nüfuz etmesi doğrudan zararları gibi görünse de bu malzemeler toprağa, havaya ve suya karışarak dolaylı olarak tüm ekosistemi felç etme gücüne sahiptir.

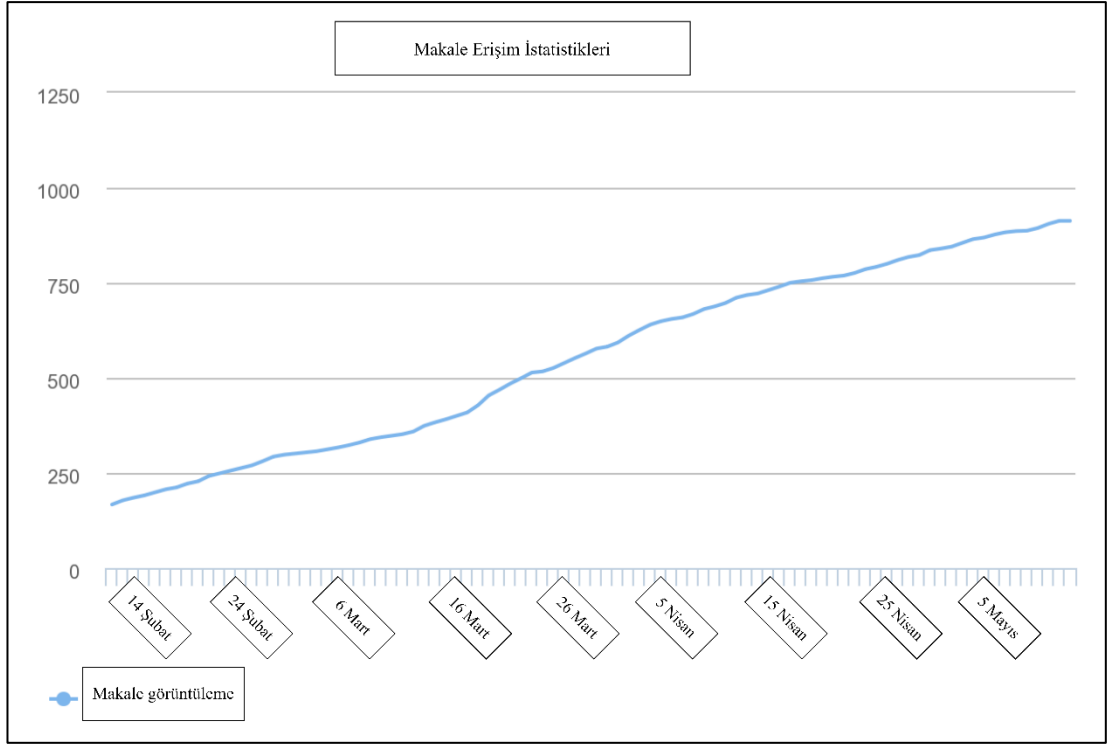
AEEE yönetmeliğini 2012 yılında uygulamaya koyan ve 80 milyonu aşan nüfusuyla gelişmekte olan bir ülke olan Türkiye’de ise 2019 yılında 847 bin ton e-atık üretilmiş olup (Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı 2012), batı Asya alt bölgesinde en yüksek e-atık üreten ülke konumundadır. Asya ülkeleri içinde ise Çin, Hindistan, Japonya ve Endonezya’dan sonra en çok e-atık üreten beşinci ülkedir (Forti ve diğ. 2020). Hanelerde cep telefonu bulunma oranının 2018 yılında %98’e ulaşması ise Türkiye’nin büyük bir elektronik pazar tüketicisi ve dolayısıyla bir e-atık fabrikası olduğunun da göstergesidir. Ancak Türkiye’de 2017 yılında oluşması beklenen atığın sadece %3’lük bir oranı işlenmiştir (Sanayi Ve Teknoloji Bakanlığı 2021). 2023 yılı mart ayı sonunda Türkiye’de faaliyet gösteren AEEE işleme tesisi sayısı 137’si lisanslı ve 29’u geçici faaliyet belgesine sahip olmak üzere toplam 166’ya ulaşmıştır (Çevre Şehircilik Ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2022a). Bu tesislerin yıllara göre değişimi Şekil 1.2’de ve illere göre dağılımı Şekil 1.3’te yer almaktadır.



Şekil 1.2: Yıllara göre AEEE işleme tesisi sayılarının değişimi

niteliktedir. Bu nedenle, e-atıkların geri dönüşümü ve geri kazanımı ile elde edilebilecek malzemeler ve ekonomik getirileri ile sahip oldukları tehlikeli malzemelerin uygun bir şekilde bertaraf edilmesiyle sağlanabilecek olan katkının ölçülebilir olması, e-atık yönetim sürecinin en önemli ayaklarından biridir. Çünkü e-atık yönetim stratejilerinde karar vericilerin oluşan ve oluşabilecek e-atık miktarına göre karar alması gereken birçok konu mevcuttur: Hükümetlerin, uluslararası komisyon ve kuruluşların küresel, bölgesel ve ülke bazında e-atık oluşumunun, toplama, geri kazanım, geri dönüşüm miktarlarının ve hedeflerinin belirlenmesi, bakanlıklar, belediyeler ve yerel yönetimlerin bölge, il, ilçe, mahalle ve köylerde e-atık bilgilendirme, toplama şekli ve noktalarını belirleme, personel eğitimi ve tahsisi vb. faaliyetleri planlama, yetkilendirilmiş kuruluşların atık yönetim planlarını oluşturması, EEE üretici firmaların üretici sorumlulukları kapsamında yüklenecekleri maliyetlerin hesaplanması, AEEE işleme tesislerinin yer seçimi ve kapasite planlaması, e-atık taşıma faaliyetlerinin organizasyonunu, planlaması, rotalaması vb.

Bu tez çalışmasının, tezin motivasyon kaynağı olan “ne kadar” sorusuna cevap aramış ve çözüm yöntemleri üretmiş olması nedeniyle, e-atık yönetim sürecinde tüm paydaşlara karar verme noktasında kıymetli girdiler ve sonuçlar ürettiği olması bakımından önemli olduğu; kullanılan ve önerilen yöntemlerin de hem literatüre hem de uygulamaya yönelik katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların bir bölümünden 2023 Şubat ayında yayınlanmış olan bilimsel makale (Ozsut Bogar ve Gungor 2023) Şekil 1.4’te verilen görüntüleme sayısı ulaşmış ve araştırmacılar tarafından takip edilerek karşılaştırmalı çalışmalar için veri talepleri yazarlara iletilmiştir. Yapılan çalışmanın kısa zamanda yüksek bir etkileşime sahip olması tezin önemini somut bir örneği olarak değerlendirilebilir.



Şekil 1.4: Tez kapsamında yayınlanan makalenin (Ozsut Bogar ve Gungor 2023) erişim sayısı (10.05.2023)

1.2 Araştırma Kapsamı ve Amaçlar

Bu tez çalışması aşağıda sıralanan orijinal katkıları sağlamaktadır:

İlk olarak, e-atık tahmin yöntemlerini ele alan kapsamlı bir literatür analizi ortaya konmuştur. Bu analizde, e-atık miktarını belirleyen çalışmalar yöntem, bölge, tahmin periyodu gibi farklı açılardan ele alınarak tartışılmıştır. Analiz sonuçları güncel eğilimler, fırsatlar ve eksiklikler yönüyle ele alınmıştır. Aynı zamanda literatür Türkiye e-atık tahmini özeline de indirgenerek boşluklar tespit edilmiştir.

İkinci olarak, oluşan e-atık miktarını tahmin etmek için Geliştirilmiş Carnegie Mellon (GCM) yöntemi önerilmiştir. Önerilen bu yöntem, literatürde mevcut olan ve Input-Output Analysis (IOA)'ya dayalı tahmin yöntemlerinden biri olan Carnegie Mellon yönteminin geliştirilmiş formudur. Önerilen GCM yönteminin amacı, mevcut CM yönteminin ürün ömrünü sabit alan yaklaşımını dinamik hale getirmektir. GCM yönteminde, teknolojinin hızlı değişimi ve ürün ömürlerinde ortaya çıkan değişiklikler

ürün ömrünün ürünün piyasaya sürüldüğü yıla göre farklı olabileceği şekilde tasarlanmıştır. Böylelikle, e-atık tahmininde zamana bağlı ürün ömrü değişimine cevap verebilen bir model ortaya konmuştur.

Üçüncü olarak, e-atık tahmin literatüründe gelecek tahmini yapılırken alternatif yöntemlerin değerlendirmeye alınmamasının bir eksiklik olduğu tespit edilmiştir. E-atık tahmininde kayıtlı e-atık verilerin olmaması nedeniyle yapılan tahminlerin doğruluğunun sınırlanması büyük bir problemdir. Genel e-atık tahmin literatüründe çalışmaların çoğunun örnek olay olduğu görülmüştür. Aynı zamanda Türkiye e-atık tahmin literatür analizinde de Türkiye için yapılan e-atık tahmin çalışmalarının yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, tez kapsamında satış verileri ve dinamik ürün ömrüne dayalı sistematik bir tahmin yaklaşımı ortaya konmuştur. Önerilen yaklaşım hem girdi-çıkı analizine dayalı bir tahmin yöntemini hem de gelecek tahmini için farklı zaman serisi (ZS) tahmin yöntemlerini kullanarak tahmin sürecini sistematik bir hale getirmektedir. Bu yaklaşımın amacı, veri kaydının bulunmadığı şartlarda yapılan tahminlerin doğruluğunu arttırmak için, alternatif yöntemler içinden en iyi modelleme kabiliyetine sahip tahmin yönteminin seçilmesini sağlamaktır. Önerilen yöntem, Türkiye örneğinde atık cep telefonlarının tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Böylelikle, hem Türkiye e-atık tahmin literatüründe yer alan bilimsel çalışma eksikliği tamamlanmış hem de benzer örnek olaylar için birden fazla yöntemin değerlendirmeye alınması gerekliliği ortaya konmuştur.

Son olarak ise e-atık tahmini için Trigonometri Tabanlı Ayrık Gri Model (Trigonometry-Based Discrete Grey Model, TBDGM (1,1)) önerilmiştir. Bu yöntemin amacı ise, son yıllarda kayıt altına alınmaya başlanan e-atık miktarlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesidir. Sınırlı veri şartlarında iyi çözümler üreten gri modeller e-atık tahmininde de kullanılmakta olup, verilerin barındırdığı düzensizlik ve belirsizliklerin modellenmesi amacı ile TBDGM (1,1) modeli önerilmiş, önerilen modelin geçerliliği literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılarak sınanmıştır. Aynı zamanda model Türkiye’de beyan edilen e-atık verileri için de sınanarak, Türkiye’nin e-atık oluşumu tahmin edilmiştir.

Özetlenecek olursa, tez kapsamında kapsamlı literatür, Türkiye e-atık tahmin literatürü ve uygulamaları analizleri sonucunda eksiklikler ile boşluklar tespit edilmiştir. Hem metodolojik hem de uygulamaya ve günün ihtiyaçlarını karşılamaya

yönelik yöntemler ile yaklaşımlar önerilerek e-atık tahmin literatürüne ve Türkiye e-atık tahmin çalışmalarına katkı sağlanmıştır.

1.3 Tezin Organizasyonu

Tezin izleyen bölümlerinin akışı şu şekildedir: İkinci bölümde e-atık miktarını belirleyen çalışmalar tarihsel gelişime göre sıralanmış; ülke, yöntem, veri, birim gibi farklı kriterlere göre incelenmiştir. Elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Üçüncü bölümde ise, e-atık tahmini ve tez kapsamında yapılan çalışmalar için ön bilgi vermek amacıyla literatürde mevcut olan e-atık tahmin yöntemlerine yer verilerek bu yöntemler örneklendirilmiştir. Dördüncü bölümde materyal ve yöntemler kısaca özetlenmiş, bu yöntemlere ait detaylar beşinci, altıncı ve yedinci bölümlerde uygulamalarıyla birlikte verilmiştir. Bölüm 5'te, Geliştirilmiş Carnegie Mellon yöntemi, formülasyonu ve örnek çözümüne yer verilmiştir. Bölüm 6'da e-atık tahmini için önerilen sistematik tahmin yaklaşımı ve Türkiye için atık cep telefonu uygulaması örneği yer almaktadır. Yedinci bölümde ise tez kapsamında e-atık tahmini için önerilen TBDGM (1,1), karşılaştırmalı analizler ve Türkiye uygulaması örneği sunulmuştur. Son olarak sekizinci bölümde ise tez çalışmasının sonuçları, katkıları, sınırlılıkları ve gelecekteki çalışma alanları ile fırsatlar tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR

E-atık tahmin çalışmaları 2000’li yıllardan hemen önce başlamıştır (Lohse ve diğ. 1998; Matthews ve diğ. 1997; Nathani ve Arnsberg 1998). Literatürde e-atık oluşumunu tahmin etmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Tez kapsamında literatür analizi üç şekilde ele alınmıştır: Farklı kriterlere göre (yöntem, bölge vb.) e-e-atık ile ilgili tahmin çalışmalarının analizi, döngüsel ekonomi penceresinden e-atık tahmini ve Türkiye’de e-atık tahmin çalışmaları.

E-atık miktar belirleme çalışmalarını sınıflandırmak için iki seviyeli bir taksonomi kullanılmıştır. İlk olarak, çalışmalar "AEEE veya e-atık veya elektronik atık" ve "oluşum veya miktar belirleme veya tahmin" arama ifadeleri kullanılarak filtrelenmiştir. İkinci seviyede literatürü derinlemesine incelemek için sekiz alt kategori belirlenmiştir. Bunlar tahmin yöntemi, ürün tipi, ülke/bölge, ürün ömrü, birim veya ağırlık olarak tahmin tipi, tahmin periyodu, gerek duyulmuş ise eğitim verileri, tahmin yöntemi ve veri kaynağıdır. Tez kapsamında e-atık tahmin literatürü Tablo 2.1’de verildiği şekilde detaylandırılmış, sonrasında alt kriterlere göre analiz sonuçları ve metodolojik eksikliklerle birlikte tespitlere yer verilmiştir.

Alt kategorilerle ilgili analiz ve tartışmalara geçmeden önce, literatür analizi ile ilgili bazı notlar bulunmaktadır: Tez kapsamında analiz edilen ve en sık kullanılan ürünler UNU-KEY kodları ile Tablo 2.2’de verilmiştir. UNU-KEYS, Birleşmiş Milletler Üniversitesi tarafından tanımlanan e-atıkları genel olarak 54 homojen ürün tipinde gruplandırılan e-atık sınıflandırmasıdır (Baldé ve diğ. 2017). Literatür analizi yapılırken çalışmalarda yer alan ancak detayı belirtilmeyen kişisel bilgisayarlar masaüstü olarak, televizyonlar katot ışın tüplü televizyonlar (Cathode Ray Tube TV) olarak ve monitörler katot ışın monitörler (Cathode Ray Tube Monitors, CRT) olarak dikkate alınmıştır. Literatürde çok farklı yöntemlerin kullanılması ve farklı türde verilere ihtiyaç duyulması nedeniyle veri kaynakları da çeşitlidir. Ayrıca her bir ülkenin ürün çeşitleri ve veri mevcudiyeti de birbirinden farklılık gösterebilmektedir. Veri kaynakları, devlet kaynaklarından sağlanan istatistikler, kurum istatistikleri veya raporları (Avrupa Çevre Ajansı-EEA, Ekonomik İş birliği ve Kalkınma Örgütü-OECD, vb.), anketler, endüstriyel kaynaklar vb. şeklinde genelleştirilmiştir.

Tablo 2.1: E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar

Çalışma	Tahmin yöntemi*	Ürün (UNU-KEY)	Ülke/Bölge	Ürün ömrü (sabit/dağılım bazlı- DB)	Tahmin birimi	Eğitim verisi	Tahmin periyodu	Veri kaynağı
Tasaki ve diğ. (2004)	DD, LM	0407	Japonya	DB	kg	N/A	1995-2020	Toplanan TV'ler, Organizasyon İstatistikleri ve Literatür
Streicher-Porte ve diğ. (2005)	SD	0302	Hindistan / Delhi	Sabit	adet	N/A	2003-2010	Organizasyon İstatistikleri
Peralta ve Fontanos (2006)	CM	0104, 0108, 0111, 0403, 0407	Filipinler	Sabit	adet	N/A	1995, 2000, 2005, 2010	Organizasyon İstatistikleri
Jain ve Sareen (2006)	SD	0407, 0302	Hindistan / Delhi	Sabit	adet	N/A	-2010	Organizasyon İstatistikleri ve Anket
Kumar ve Shrihari (2007)	SD, DD, C&U	0104, 0108, 0302, 0306 , 0407	Hindistan / Mangolara	Sabit/DB	kg, ton	N/A	2007-2015, 2007	Organizasyon İstatistikleri

Tablo 2.1 (Devam): E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar

Çalışma	Tahmin yöntemi*	Ürün (UNU-KEY)	Ülke/Bölge	Ürün ömrü (sabit/dağılım bazlı- DB)	Tahmin birimi	Eğitim verisi	Tahmin periyodu	Veri kaynağı
Oguchi ve diğ. (2008)	DD	99 farklı ürün tipi	Japonya	DB	adet	N/A	2003	Endüstriyel Kaynaklar, Literatür ve Anketler
Yang ve Williams (2009)	LM	0302, 0303	Amerika Birleşik Devletleri	DB	adet	1978-2008	1980-2050	Organizasyon Raporları, Anket Raporları ve Literatür
Walk (2009)	DD	0308, 0407	Almanya/ Baden-Württemberg	DB	ton	N/A	200-2015	Geri Dönüşüm Merkezleri, Endüstriyel Kaynaklar
Robinson (2009)	C&U	0302, 0305, 0306 , 0308, 0403	Genel	Sabit	kg	N/A	2009	Organizasyon İstatistikleri ve Literatür
Dwivedy ve Mittal (2010)	CM	0104, 0108, 0302, 0303, 0407	Hindistan	Sabit	adet	N/A	2007-2011	Literatür ve sektörel raporlar
Steubing ve diğ. (2010)	CM	0302, 0303, 0308, 0309	Şili	Sabit	kg	N/A	1996-2020	Organizasyon İstatistikleri

Tablo 2.1 (Devam): E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar

Çalışma	Tahmin yöntemi*	Ürün (UNU-KEY)	Ülke/Bölge	Ürün ömrü (sabit/dağılım bazlı- DB)	Tahmin birimi	Eğitim verisi	Tahmin periyodu	Veri kaynağı
Dwivedy ve Mittal (2010)	LM, CM	0302, 0303	Hindistan	DB	adet	1994-2007	1994-2026	Organizasyon İstatistikleri ve Endüstriyel Kaynaklar
Chung ve diğ. (2011)	C&U	0104, 0108, 0111, 0302, 303, 0407	Çin / Hong Kong	Sabit	kg	N/A	2009	Anketler
Polak ve Drapalova (2012)	DD	0306	Çek Cumhuriyeti	DB	adet	N/A	1995-2020	Organizasyon İstatistikleri, Geri Dönüşüm Merkezleri ve Mobil Operatör
Araújo ve diğ. (2012)	C&U, TS	0108, 0104, 0302, 0303, 0403	Brezilya	Sabit	ton	N/A	2000-2008 ve 2008	Organizasyon İstatistikleri ve Endüstriyel Kaynaklar
Wang ve diğ. (2013)	SD, DD, CM, C&U, TS	0104, 0303 0407, 0408	Finlandiya	Sabit/DB	kg	N/A	1990-2011	Organizasyon İstatistikleri, Endüstriyel Kaynaklar ve Anketler

Tablo 2.1 (Devam): E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar

Çalışma	Tahmin yöntemi*	Ürün (UNU-KEY)	Ülke/Bölge	Ürün ömrü (sabit/dağılım bazlı- DB)	Tahmin birimi	Eğitim verisi	Tahmin periyodu	Veri kaynağı
Kim ve diğ. (2013)	LM	0108, 0104, 0111, 0114, 0204, 0306 , 0407, 0408	Güney Kore	DB	adet	1980-2009	2000-2020	Organizasyon Raporları ve Anketler
Pant (2013)	Matematiksel denklem	0308, 0104, 0111, 0114, 0302, 0303	Hindistan/ Dehradun	Sabit	adet	N/A	Zamana bağlı denklem	Organizasyon İstatistikleri ve Satış distribütörleri
Öztürk (2014)	C&U	0108, 0102, 0104, 0109, 0111, 0302, 0305, 0306 , 0404, 0407	Türkiye	Sabit	ton	N/A	2002-2012, 1999-2012 TV, 2005-2012 PC	Organizasyon İstatistikleri ve Literatür
Yazici ve diğ. (2014)	DD	0108	Türkiye	DB	ton, adet	N/A	2013	Endüstriyel Kaynaklar ve Literatür
Li ve diğ. (2015)	DD, C&U, TS	0306	Çin	Sabit/DB	adet	N/A	1998-2012	Organizasyon İstatistikleri ve Anketler

Tablo 2.1 (Devam): E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar

Çalışma	Tahmin yöntemi*	Ürün (UNU-KEY)	Ülke/Bölge	Ürün ömrü (sabit/dağılım bazlı- DB)	Tahmin birimi	Eğitim verisi	Tahmin periyodu	Veri kaynağı
Kalmyko va ve diğ. (2015)	DD	0302, 0308, 0309, 0407, 0408	İsveç	DB	ton, adet	N/A	2014-2040	Eski TV ve monitörler
Alavi ve diğ. (2015)	C&U	0108, 0109, 0102, 0104, 0111, 0302, 0303, 0306 , 0305, 0407, 0308	İran/Ahvaz	Sabit	ton	N/A	2011	Anketler ve Literatür
Ikhllyel (2016)	SD, CM, C&U, SM, TS	0108, 0407, 0104, 0302, 0303, 0306	Ürdün/Orta Doğu-Kuzey Afrika Doğu-Batı Avrupa, Asya/Pasifik	Sabit	kg	N/A	2015	Organizasyon İstatistikleri
Petridis ve diğ. (2016)	LM ve zaman serileri	0302, 0303	Japonya/Avustralya/Y. Zelanda, Kuzey ve Güney/Orta Amerika	DB	adet	1985-2012	2013-2030	Organizasyon İstatistikleri ve endüstriyel kaynaklar

Tablo 2.1 (Devam): E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar

Çalışma	Tahmin yöntemi*	Ürün (UNU-KEY)	Ülke/Bölge	Ürün ömrü (sabit/dağılım bazlı- DB)	Tahmin birimi	Eğitim verisi	Tahmin periyodu	Veri kaynağı
Zhao ve diğ. (2016)	GM	0108, 0407, 0104, 0111, 0302, 0303	Çin	Sabit	adet	2001-2013	2014-2040	Literatür
Salihoğlu ve Kahraman (2016)	C&U	0108, 0407, 0104, 0302, 0303, 0306	Türkiye / Bursa	Sabit	kg	N/A	2015	Anketler
Golev ve diğ. (2016)	SSL	0108, 0109, 0104, 0102, 0111, 0302, 0303, 0306 , 0114, 0404, 0304	Avustralya	DB	ton	N/A	2010-2024	Organizasyon İstatistikleri
Guo ve Yan (2017)	LM	0306	Çin	DB	kg, adet	1997-2015	1997-2025	Organizasyon İstatistikleri ve Anketler

Tablo 2.1 (Devam): E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar

Çalışma	Tahmin yöntemi*	Ürün (UNU-KEY)	Ülke/Bölge	Ürün ömrü (sabit/dağılım bazlı- DB)	Tahmin birimi	Eğitim verisi	Tahmin periyodu	Veri kaynağı
Gusukuma ve Kahhat (2018)	MFA	0407	Peru	-	adet	N/A	2005-2017, 2025	Organizasyon İstatistikleri
Tran ve diğ. (2018)	DD, MFA	0407	Vietnam	DB	adet	N/A	1966-2030	Organizasyon İstatistikleri ve Literatür
Wang ve diğ. (2018)	DD, LM	0407, 0408	Çin	DB	adet	1992-2012	1992-2040	Organizasyon İstatistikleri, Endüstriyel Raporlar ve Literatür
Kececi ve diğ. (2018)	CM	0104, 0108, 0204, 0308, 0309	Türkiye/ Ankara, Çankaya İlçesi	Sabit	ton	N/A	2011-2016	Anketler, Ömür için resmi veriler
Thiébaud-Müller ve diğ. (2018)	MFA	0407, 0408 0302, 0309, 0303, 0306 , 0305, diğ.	İsviçre	Sabit/DB	-	N/A	2014	Anketler

Tablo 2.1 (Devam): E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar

Çalışma	Tahmin yöntemi*	Ürün (UNU-KEY)	Ülke/Bölge	Ürün ömrü (sabit/dağılım bazlı- DB)	Tahmin birimi	Eğitim verisi	Tahmin periyodu	Veri kaynağı
Duman ve diğ. (2019)	GM	0302, 0303	Amerika Birleşik Devletleri	-	adet	2003-2017	2018-2030	Organizasyon İstatistikleri
Sajid ve diğ. (2019)	MFA	0302, 0308, 0303	Pakistan	Sabit	adet	N/A	2005-2020	Saha Ziyaretleri ve Anketler
Ravindra ve Mor (2019)	Ortalama hane halkı sayısı	0104, 0111, 0302, 0308, 0309, 0303, 0306 , diğ.	Hindistan/ Chandigarh	Sabit	kg, adet	N/A	2016	Anketler
Abbondanza ve Souza (2019)	DD	0108, 0109, 0308, 0309, 0407, 0408, 0104, 0111, 0302, 0303, 0306 , 0305, 0403, diğ.	Brezilya / Sao Jose dos Campos	DB	kg, adet	N/A	2009-2017, 2014-2025	Anketler
Golev ve diğ. (2019)	MFA	Baskı devre	Avustralya	-	ton	N/A	2010-2024	Literatür ve ulusal istatistikler

Tablo 2.1 (Devam): E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar

Çalışma	Tahmin yöntemi*	Ürün (UNU-KEY)	Ülke/Bölge	Ürün ömrü (sabit/dağılım bazlı- DB)	Tahmin birimi	Eğitim verisi	Tahmin periyodu	Veri kaynağı
Gonda ve diğ. (2019)	C&U, MFA	0302	Belçika /Brüksel, Valon Bölgesi	Sabit	ton	N/A	2013	Organizasyon İstatistikleri ve Raporları
Islam ve Huda (2019)	Holt's	51 tür	Avustralya	DB	ton	1988-2017	2018-2047	Kuruluş istatistikleri (Uncomtrade), Küresel raporlar
Duman ve diğ. (2020)	GM	Genel	Amerika Birleşik Devletleri	-	ton	2003-2015	2016-2023	Organizasyon istatistikleri
Kosai ve diğ. (2020)	Bass	0104, 0108, 0111, 0407	Vietnam	DB	adet	1977-2014	2015-2050	Organizasyonel istatistikler, literatüre dayalı

Tablo 2.1 (Devam): E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar

Çalışma	Tahmin yöntemi*	Ürün (UNU-KEY)	Ülke/Bölge	Ürün ömrü (sabit/dağılım bazlı- DB)	Tahmin birimi	Eğitim verisi	Tahmin periyodu	Veri kaynağı
Li ve diğ. (2020)	SM-güncel	0306	Çin	-	adet	1997-2017	2009-2017	Sanayi ve Bilgi Teknolojileri Bakanlığı
Kazancoglu ve diğ. (2020)	GM	Genel	Türkiye	-	ton	2011-2018	2019-2021	Devlet tarafından toplanan e-atık
Ryan - Fogarty ve diğ. (2021)	Saha veri analizi	Genel-atık malzeme	İrlanda	-	kg, adet		2019	Hurda metal işleme siteleri ve EPA raporları
He ve diğ. (2021)	GM	Genel	Amerika Birleşik Devletleri	-	ton	2003-2015	2016-2025	Organizasyon istatistikleri
Zeng ve diğ. (2021)	Bass ve Kuznet's eğrisi	33 tür	Çin	DB	adet, ton	1990-2019	2010-2050	Çin Ulusal İstatistik Bürosu, Çin Gümrük İstatistikleri

Tablo 2.1 (Devam): E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar

Çalışma	Tahmin yöntemi*	Ürün (UNU-KEY)	Ülke/Bölge	Ürün ömrü (sabit/dağılım bazlı- DB)	Tahmin birimi	Eğitim verisi	Tahmin periyodu	Veri kaynağı
Zhang ve diğ. (2021)	DD	Baskı devre	Çin	DB	adet, ton	1980-2018	1998-2035	Çin Ulusal İstatistik Bürosu
Koshta ve diğ. (2021)	DD, S şekilli eğriler	0306	Hindistan / Delhi	DB	adet	2008-2019	1995-2030	Literatür ve Telekom İstatistikleri Hindistan
Kastanaki ve Giannis (2022)	LM, DD	0306	Yunanistan	DB	adet, ton	1995-2010	1995-2035	Organizasyon istatistikleri
Sakthivel ve diğ. (2022)	MFA, DD	0104, 0108, 0302, 0303	Hindistan	DB	adet	1990-2019	2010-2030	Literatür, UN COMTRADE pazar araştırma firması, Dış İlişkiler ve Ticaret Departmanları

Tablo 2.1 (Devam): E-atık miktarının belirlenmesi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar

Çalışma	Tahmin yöntemi*	Ürün (UNU-KEY)	Ülke/Bölge	Ürün ömrü (sabit/dağılım bazlı- DB)	Tahmin birimi	Eğitim verisi	Tahmin periyodu	Veri kaynağı
Li ve diğ. (2022)	SM	0306	Çin	-	adet, ton	-	1998-2020	Resmi veriler, anket
Owusu-Sekyere ve diğ. (2022)	Malzeme analizi	Genel	Gana	-	ton	-	2021	Hurdalık sahası verileri
Ozsut Bogar ve Gungor (2023)	DD ve zaman serileri	0306	Türkiye	DB	adet, ton	2001-2020	2021-2035	İstatistiksel veriler, literatür

* Sales Method (SM), Simple Delay Method (SD), Distribution Delay Method (DD), Carnegie Mellon Method (CM), Time Step Method (TS), Consumption and Use Method (C&U), Material Flow Analysis (MFA), Grey Model (GM), Logistic Model (LM), Sales-Stock-Lifespan (SSL)

Tablo 2.2: UNUKEY kodları ve açıklamaları

UNU KEY	Tanım	UNU KEY	Tanım
0102	Bulaşık makineleri	0305	Telekom (ör. kablosuz telefonlar, telesekreterler)
0104	Çamaşır Makineleri	0306	Cep Telefonları (akıllı telefonlar, çağrı cihazları dahil)
0108	Buzdolapları	0307	Profesyonel BT (ör. sunucular, yönlendiriciler, veri depolama, fotokopi makineleri)
0109	Dondurucular	0308	Katot Işın Tüpü Monitörleri
0111	Klimalar (ev tipi ve portatif)	0309	Düz Ekran Panel Monitörler (LCD, LED)
0114	Mikrodalgalar	0401	Küçük Tüketici Elektroniği (ör. kulaklıklar, uzaktan kumandalar)
0202	Gıda (ör. ekmek kızartma makinesi, ızgaralar, gıda işleme, kızartma tavaları)	0403	Müzik Aletleri, Radyo, HiFi (ses setleri dahil)
0204	Elektrikli Süpürgeler (profesyoneller hariç)	0404	Video (ör. video kaydediciler, DVD, alıcı kutuları)
0302	Masaüstü PC'ler (monitörler, aksesuarlar hariç)	0407	Katot Işın Tüplü TV'ler
0303	Dizüstü bilgisayarlar (tabletler dahil)	0408	Düz Ekran Panel TV'ler (LCD, LED, plazma)
0304	Yazıcılar (ör. tarayıcılar, çok işlevli cihazlar, faksler)		

E-atıklar AEEE yönetmeliğine göre 10 genel ürün grubuna ayrılmıştır (Directive 2012). Literatürde en sık tahmini yapılan gruplar büyük ev eşyaları ile bilgi teknolojileri ve telekomünikasyon ürünleridir. Bu gruptaki ürünlerin daha sık tahmin edilmesinin nedeni yaygın kullanımları ve bu nedenle oluşan e-atığın büyük bir kısmını oluşturuyor olmalarıdır. Ev aletlerinden buzdolabı, televizyon ve çamaşır makinesinin, bilgi teknolojileri ve telekomünikasyon ürünlerinden ise cep telefonu ve

bilgisayar ürünlerinin daha çok tahmin edildiği görülmektedir. Tahmin çalışmalarının birimi ise genellikle ağırlık veya birim cinsinden hesaplanmaktadır. Ağırlık ise e-atıkların toplam ağırlığı veya kişi başına düşen ürün ağırlığı olarak ele alınmaktadır. Örneğin Türkiye için AEEE yönetmeliğinde toplama hedeflerinin birimi kişi/kg olarak belirlenmiştir (Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı 2012). Bazı çalışmalarda ise hem ağırlık hem de adet tahmini yapılmıştır (Abbondanza ve Souza 2019; Ravindra ve Mor 2019). E-atıkların taşınması, depolanması vb. durumlar için araç kapasitesi, ağırlık taşıma üst sınırı, tesis depo kapasitesi, işleme kapasitesi gibi kısıtlar söz konusu olacağından hacim ya da ağırlık birimi üzerinden tahmin ve planlama yapmak daha uygun olacaktır. Ancak cep telefonu, bilgisayar gibi kıymetli madenleri ürün ağırlığına oranla daha yüksek miktarda içeren ürünlerin tahmininde birim üzerinden hareket edip devamında ağırlıkla ilişkilendirmek gerekebilmektedir. E-atık tahmininde veri kayıtlarının bulunmaması veya veri kayıtlarının eksik/yetersiz olması ise büyük bir problemdir. Tablo 2.1’de görüldüğü üzere, çalışmaların çoğunluğunda ankete başvurulmuştur. Kullanılan/depolanan/geri dönüşüme kazandırılan ürünler, sayıları ve bu ürünlerin ömürlerine dair veriler için sıkça anket çalışmalarından istifade edilmektedir. Anketlerin ve saha çalışmalarının kapsamına göre ürün ömürleri sabit bir değer olarak hesaplanabilmekte veya belirli dağılımlara uyduğu kabul edilmektedir. Çalışmaların bir bölümünde ise ürün ömürleri literatürde yapılan çalışmalara dayalı varsayım olarak kabul edilmekte ve/veya uyarlanmaktadır (Öztürk 2014). Verilerin kayıt altında olup olmaması, varsayıma veya ankete dayalı olmasına ve kullanılan tahmin yöntemine bağlı olarak, çalışmaların tahmin periyodu da birbirinden farklılık göstermektedir. Girdi-çıkıtı analizine dayalı yöntemlerle veri olan yıllar ve en çok ürün ömrü kadar ötelenmiş yılların tahmini yapılabilirken; klasik ve hibrit tahmin yöntemleriyle gelecek yılların tahmini daha uzun vadede yapmak mümkündür. Bu yöntemlerle tahminde bulunabilmek için gerçekleşmiş veriye (eğitim verileri) ihtiyaç duyulmaktadır. Eğitim verileri gerçekleşen dönemlere ait verilerdir ve bu eğitim verileri ile kullanılan yöntemin gerçek sistemi modelleyebilme başarısı en büyüklendikten sonra, ilerleyen yıllar için tahmin yapılmaktadır. Çalışmaların bir bölümünün odak noktası ise malzeme akışı olduğu için, sadece belirli tek bir yıl için tahminler de yapılabilir (Gonda ve diğ. 2019; Ravindra ve Mor 2019; Thiebaud ve diğ. 2017). E-atıkların tüm dünyanın ortak bir problemi haline gelmesi ise literatürün coğrafi olarak dünyanın her bölgesine yayılmış olmasından anlaşılmaktadır. Tablo 2.1’e göre e-atık tahmin çalışmalarının genel olarak e-atığın

çokça olduğu nüfus yoğun ülkelerde ve e-atık yönetiminin yasa ve direktiflerle takip edildiği ülkelerde daha sık yapıldığı söylenebilir. Ayrıca her bir ülkenin hatta ülkelerdeki bölgelerin bile yapıları birbirinden farklı olduğu için, çalışmalar daha çok ülke/bölge bazında örnek olaylar olarak gerçekleştirilmektedir.

2.1 Yöntemler Açısından Literatür Analizi ve Eksiklikler

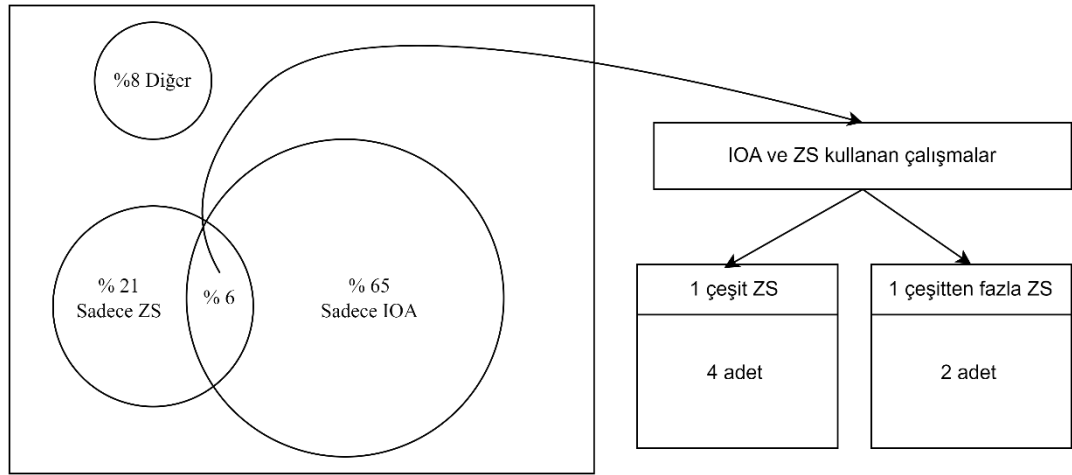
Çalışmalar kullandıkları metodoloji açısından incelendiğinde, kullanılan tahmin yöntemleri girdi-çıkı çıktı analizine (IOA) dayalı tahmin yöntemleri, zaman serisi tahmin yöntemleri ve hibrit tahmin yöntemleri (hem IOA hem de ZS kullanan) olarak üç gruba ayrılabilir (Bogar ve diğ. 2019).

IOA'ya dayalı tahmin yöntemlerinden ürün ömrünün bir dağılıma sahip olduğu Dağılımlı Gecikme (DD) yöntemi, ürünlerin yeniden kullanım ve depolama gibi farklı yaşam evrelerini de dikkate alan Carnegie Mellon yöntemi ve yıllık ortalama oluşacak e-atık miktarını sabit ürün ömrü ile tahmin eden C&U yöntemi ise en yaygın kullanılan IOA'ya dayalı tahmin yöntemleridir. Genel tahmin yöntemlerini kullanan çalışmalar daha çok zaman serileri analizi temelli olup lojistik model, Bass, Gompertz, Trend ve verilerin az ve belirsiz olması durumunda kullanılan gri modeller olarak sıralanabilir (Duman ve diğ. 2019; Petridis ve diğ. 2016). Hibrit modeller ise genel tahmin modelleriyle IOA'ya dayalı yöntemleri birlikte kullanan yöntemlerdir. Yang ve Williams (2009) çalışmalarında ürün sahiplik oranları popülasyona dayalı olarak lojistik model ile tespit edilmiş, oluşan e-atık miktarı ise girdi-çıkı analizine dayalı DD yöntemi ile tahmin edilerek hibrit tahmin modeli önerilmiştir. Şu bilgiyi not etmek gerekir ki, IOA'ya dayalı tahmin yöntemleri, yalnızca verilerin gözlemlenebileceği yılları tahmin edebilir yani bir gelecek projeksiyonu yapmaları söz konusu değildir. Ancak klasik ve hibrit tahmin yöntemleri ile gelecek tahmini yapmak mümkündür. Bu yöntemleri kullanarak tahmin yapmak için gözlemlenen verilere (örnek verilerde, eğitim verilerinde) ihtiyaç vardır. Ayrıca literatürde bazı çalışmalar da malzeme akışına odaklanmıştır; bu nedenle bu çalışmalarda sadece bir yıl için tahmin yapılmıştır (Gonda ve diğ. 2019; Ravindra ve Mor 2019; Thiebaud ve diğ. 2017).

Tez kapsamında bahsi geçen üç tür tahmin grubu için metodolojik eksiklikler ve ihtiyaçlar belirlenmiş ve aşağıda sıralanmıştır:

Birincisi IOA'ya dayalı tahmin yöntemlerinden Carnegie Mellon yönteminin günümüz koşullarında geliştirilmeye ihtiyacı olduğudur. İlerleyen bölümlerde detaylıca anlatılacak olan CM yöntemi, ürünlerin farklı yaşam evrelerini dikkate alarak bir tahmin yapmaktadır. Ancak yöntem, piyasaya sürülen ya da satılan ürünlerin bu farklı yaşam evrelerindeki ömrünü sabit kabul etmektedir. Elektronik cihazların ürün ömrünün ise günümüz teknolojik değişimlerin karşısında sabit kalacağı katı bir varsayımdır. Bu nedenle tez kapsamında, daha dinamik bir yapıya sahip bir CM yöntemine ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir.

İkinci olarak ise Tablo 2.1'de verilen ve kullanılan tahmin yöntemleri Şekil 2.1'de görselleştirilmiştir. Bu şekle göre, girdi çıktı analizi (IOA), zaman serileri (ZS) ve diğer yöntemlerin (GM, site veri analizi vb.) sırasıyla çalışmaların %65, %21 ve %8'inde kullanılmıştır. İncelenen çalışmaların sadece %6'sında hibrit modeller kullanılmıştır. Hibrit modeller derinlemesine incelendiğinde, bu çalışmalardan dördünün tek bir zaman serisi ve tek bir IOA yöntemi kullandığı görülmüştür. Hibrit modellerde çoklu tahmin modellerini kullanan çalışmaların sayısı ise çok azdır. Tez kapsamında, sistematik bir hibrit tahmin yaklaşımı önermenin metodolojik motivasyonu da literatürdeki bu boşluktan gelmektedir.



Şekil 2.1: Tahmin yöntemleri literatür özeti

Üçüncü olarak ise, Şekil 2.1'de diğer kategorisinde gösterilen ancak bir tür zaman serisi olarak da ifade edilen gri modellerin e-atık tahmininde son yıllarda başarılı sonuçlar ürettiği görülmüştür (Guo ve Zhong 2021; Kothari ve diğ. 2011; Mao ve diğ. 2020). Ancak verilerin az ve belirsiz olduğu koşullarda iyi sonuçlar üretebilen

GM tabanlı modellerin kullanımı e-atık tahmin literatüründe henüz az sayıdadır. Tablo 2.3 bu çalışmaları farklı açılardan özetlemektedir. Literatür taramasından ulaşılan sonuçlara göre, GM model ile e-atık tahmini ilk olarak Kothari ve diğ. (2011)'nin çalışmasıdır. E-atık tahmininde zaman içinde farklı türde gri modeller kullanılmıştır. Tek değişkenli veya birden fazla girdiyi dikkate alan çok değişkenli modeller kullanılmıştır. Çalışmaların coğrafi olarak yüksek nüfusa sahip gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerde yürütüldüğü görülmektedir. Projeksiyon dönemleri genellikle kısa veya orta vadelidir, çünkü GM sınırlı veri kullanmaktadır. E-atık tahmin literatüründe meta sezgisel yöntemin kullanıldığı ilk çalışma ise Duman ve diğ. (2019)'nin çalışmasıdır. E-atık veri kayıtlarının henüz yeni oluşuyor olması nedeniyle, sınırlı veri şartlarında etkin çözümler üretebilen bu yöntemlerin önümüzdeki yıllarda e-atık tahmininde daha yaygın kullanılacağı ve e-atık tahmin literatürünün bu konuda gelişmeye açık boşluklarının olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 2.3: GM kullanan e-atık tahmin çalışmaları

Çalışma	Yöntem	Bölge	Ürün	GM türü	Yuvarlama	Eğitim	Test	Tahmin	Ana odak ve öne çıkanlar
Kothari ve diğ. (2011)	GM ve Gri ilişkisel analiz	Hindistan	Bilgisayar	GM (1,1)	N/A	2000-2004	N/A	2005-2020	Gri ilişki analizine dayalı olarak kişisel bilgisayar penetrasyon oranı, nüfus, gayri safi yurtiçi hasıla ve kişi başına gayri safi milli gelir belirlenmiş ve genelleştirilmiş regresyon sinir ağı kullanılmıştır.
Zhao ve diğ. (2016)	GM ve Gri ilişkisel analiz	Çin	Buzdolabı, çamaşır makinesi, klima, PC	GM (1,1)	N/A	2001-2013	N/A	2014-2031	Çin'deki ev aletlerinin miktarını tahmin etmek için gri modeller kullanılmıştır.
Duman ve diğ. (2019)	Çok değişkenli GM	ABD/Washington Eyaleti	Genel	NBGM (1, N)	N/A	2003-2014	2015	2016-2017 2018-2030	Girdiler, nüfus yoğunluğu ve medyan hane geliridir. PSO ile geliştirilmiş doğrusal olmayan gri Bernoulli modeli kullanılmıştır.
Duman ve diğ. (2020)	Geliştirilmiş tek değişkenli GM	ABD/Washington Eyaleti	Genel	PSO- NGBMF O (1,1) PSO- SAIGMF O (1,1)	Evet	2003-2014	2015	2016-2023	Geri dönüştürülen ve bertaraf edilen e-atık miktarı dikkate alınmıştır. Model, PSO ile optimize edilmiştir.

Tablo 2.3 (Devam): GM kullanan e-atık tahmin çalışmaları

Çalışma	Yöntem	Bölge	Ürün	GM türü	Yuvarlama	Eğitim	Test	Tahmin	Ana odak ve öne çıkanlar
Mao ve diğ. (2020)	Üstel Kernel fonksiyonu ile kesirli türev modeli	Çin	Cep telefonu, dizüstü bilgisayar, masaüstü ve televizyon atıklarından baskı devre kartlarının (PCB) ağırlığı	EFGM (q,1)	N/A	2006-2015	2016	2017-2025	Elektronik atık değerli metal içeriğinin tahmini.
Kiran ve diğ. (2021)	Çok değişkenli DGM	Hindistan	Cep telefonu, TV, PC	EFDM (1, N)	N/A	1998- 2007 PC 2007-2016 TV 2009-2017 Cep telefonu	-	2018-2030	Girdiler GSYIH, kentsel ve kırsal nüfustur. GM, kullanımdaki ürün miktarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Fourier dönüşümü ve üstel düzeltme yöntemleri, periyodik ve stokastik hataları azaltmak için birleştirilmiştir.
He ve diğ. (2021)	Ayrıştırma temelli GM	ABD/ Washing ton Eyaleti ve Birleşik Krallık	WA için genel büyük ev aletleri (LHA) ve soğutucu içeren soğutma cihazları (CAR)	GVM GWFM	N/A	2003-2014	2015	2016-2025	Ayrıştırma, üstel düzeltme modeli ve gri model yöntemleri entegre edilmiştir.

Tablo 2.3 (Devam): GM kullanan e-atık tahmin çalışmaları

Çalışma	Yöntem	Bölge	Ürün	GM türü	Yuvarlama	Eğitim	Test	Tahmin	Ana odak ve öne çıkanlar
Guo ve Zhong (2021)	Gri İlişkisel Analiz (GRA), Temel İlişkiler Analizi (PCA) ve Kernel GM	Tayvan ve Vietnam	TV, çamaşır makinesi, klima, buzdolabı	KGM (1, N)	N/A	1998-2015	2016-2020	2021-2030	Çalışma, tüketici davranışlarının toplama ve atık oluşumu üzerindeki etkisini araştırmaktadır.
Kazancoglu ve diğ. (2020)	Gri Model	Türkiye	Genel	GM (1,1)	N/A	2013-2018	N/A	2019-2021	Toplanan e-atık miktarının tahmini. Yeni bir DGM.
Tez kapsamında yapılan ilgili çalışma	Trigonometri tabanlı ayırık GM	ABD/ Washington Eyaleti ve Türkiye	Genel	TBDG M (1,1)	N/A	2013-2017 2013-2018	2018-2020 2019-2020	2021-2030	Salınımlı veri yapısı için sinüs ve kosinüs tabanlı fonksiyonların kullanımı. Jaya algoritması ile parametre optimizasyonu.

2.2 Döngüsel Ekonomi Penceresinden E-atık Tahmin Literatürü

E-atık tahmin çalışmalarına ek olarak, bu çalışmanın bir diğer merkezi konusu DE'dir. DE literatürü, tüketimin olduğu hemen hemen tüm alanları içermektedir. Ekonomide yaygın olarak iki genel model kullanılmaktadır: Lineer ekonomi (LE) ve DE. LE, tüketime dayalıdır ve tüketim sonrası aşamayı dikkate almaz (Çimen 2021). LE'deki yap-kullan-at sistemlerinin aksine DE, kapalı döngü tedarik zincirinde kaynak verimliliğine, azaltılmış atıklara ve emisyonlara odaklanır (Sohal ve De Vass 2022). DE, 3R (Reduce-Reuse-Recycle) ilkelerini göz önünde bulundurur: azalt, yeniden kullan ve geri dönüştür (Heshmati 2017). Bununla birlikte, bu DE ilkeleri literatürde 3R ile 10R arasında değişmektedir (Reike ve diğ. 2018): geri kazan, geri dönüştür, yeniden tasarla, yeniden üret, yenile, tamir et, yeniden kullan, azalt, yeniden düşün ve reddet (Reike ve diğ. 2018; Shevchenko ve diğ. 2023). E-atık tahmin literatürü DE perspektifinden değerlendirildiğinde, e-atık miktarını tahmin etmek kaçınılmaz olarak DE'nin odak noktasıdır. Ayrıca, AEEE'lerden geri kazanılan kıymetli malzemelerin ve kaynakların kullanılması da önemlidir. Literatürde iyi bir DE planının, endüstriyel şirketler için ilginç bir gelir akışı sunabileceği de ortaya konmuştur (D'adamo ve diğ. 2016). Literatürde e-atık problemi için DE'yi dikkate alan çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, Bressanelli ve diğ. (2020) DE 4R stratejilerine (azalt, yeniden kullan, yeniden üret ve geri dönüştür) dayalı e-atık literatürünü analiz etmiş, Pan ve diğ. (2022) e-atık sorunlarını ele almak için AEEE endüstrisinde uygulanan DE 10R-stratejilerini araştırmıştır. Murthy ve Ramakrishna (2022) ise e-atık yönetimi uygulamalarını sundukları çalışmalarında, politika uygulaması, teknik gereksinimler ve sosyal farkındalık yoluyla sürdürülebilirlik ve DE'ye ulaşmanın gerekliliğini vurgulamışlardır. Ayrıca, bazı araştırmalarda (Islam ve Huda 2018; Li ve diğ. 2013; Sepúlveda ve diğ. 2010) AEEE mevzuatı ve genişletilmiş üretici sorumluluğu konuları ele alınmış ve kritik malzemeler ve AEEE plastikleri üzerine durulmuştur (He ve diğ. 2006; Ongondo ve diğ. 2011; Pan ve diğ. 2022; Pérez-Belis ve diğ. 2015; Widmer ve diğ. 2005). E-atık tahmin literatürü 1990'ların sonlarından beri gelişmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda sürdürülebilirlik ve DE kavramları sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak belirtmek gerekir ki, bu terimler teknik olarak öncü e-atık tahmin çalışmalarının içeriğinde yer almasa da bu çalışmalarda e-atık tahmini doğrudan veya dolaylı olarak DE ile ilişkilidir.

2.3 Türkiye’de E-atık Tahmin Çalışmaları ve Döngüsel Ekonomi

Literatür analizinin bir diğer ayağı ise Türkiye’de yapılan e-atık tahmini ve döngüsel ekonomi çalışmalarıdır. Devlet ve sektör tarafında bazı mevzuat ve uygulamalar bulunmaktadır. Örneğin Türkiye’de 2012 yılında yürürlüğe giren AEEE yönetmeliği, çevreyi sürdürülebilir şekilde korumak için DE ve kaynak verimliliği ilkelerine dayalı olarak 26.12.2022 tarihinde güncellenmiştir (2022). Aynı zamanda Türkiye’de Elektrikli ve Elektronik Aletlerde Bazı Tehlikeli Maddelerin Kullanımlarının Kısıtlanması Yönetmeliği yürürlüğe girmiştir (Çevre Şehircilik Ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2022b). Yıllık atık beyanları, atık üreticileri tarafından Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’na bildirilmektedir. 2015–2020 yıllarında beyan edilen elektrikli ve elektronik eşya atıkları sırasıyla 32,03, 39,4, 37,3, 37,5, 46,4 ve 67,2 bin tondur (Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı 2020). Türkiye’de tüm e-atık ve ACT gibi ürün bazında atık kayıtlarını tutan belirli bir sistem yoktur. Ancak Türkiye’nin en büyük GSM operatörlerinden birinin hazırladığı araştırma raporuna göre mevcut uygulamalardaki sorunlar şu şekilde sıralanabilir (Akpulat 2020a): Kayıt dışı faaliyetler, açığa çıkan ürünün ve e-atığın miktarının belirlenmesine ilişkin belirsizlikler, sınırlı kamu kapasitesi ve mevzuat eksikliği, sınırlı kamu bilinci, standart altı ve yetersiz işleme tesisleri, yaşam döngüsü uygulamalarındaki belirsizlikler ve yetersiz toplama altyapısı. Ayrıca Türkiye’de ürünler şu anda herhangi bir sınıflandırma yapılmadan geri dönüşüm için taşınmaktadır. Bu nedenle, DE ve ürün tipine dayalı analizler için sınıflandırmaya dayalı toplama merkezlerine ihtiyaç vardır (Kazancoglu ve diğ. 2020). Türkiye, AEEE Yönetmeliğini 2012 yılında çıkarmış olmasına rağmen, Türkiye için e-atık tahmini ile ilgili çok az sayıda akademik çalışma bulunmaktadır. Türkiye’de Tablo 2.1’de verilen e-atık tahmin çalışmaları, beyaz eşya, bilgisayar ve cep telefonu ürünlerinin diğerlerinden daha fazla çalışıldığını göstermektedir. Bu çalışmalarda kullanılan yöntemler farklıdır. Çalışmalardan biri tüm ülke için AEEE’yi tahmin ederken (Öztürk 2014), diğeri şehir düzeyindedir (Salihoğlu ve Kahraman 2016). Ürün çeşitliliği açısından en kapsamlı çalışma Öztürk (2014) tarafından yapılan çalışmada sunulmuştur. Türkiye’de e-atık tahmini için yapılan ilk çalışmada C&U yöntemi kullanılarak e-atık miktarları tahmin edilmiştir (Öztürk 2014).

Tablo 2.4'te Türkiye'de yapılan e-atık tahmin çalışmaları listelenmektedir. Bu tablodan en büyük eksikliğin gelecek projeksiyonu olduğu sonucuna varılabilir. Kazancoglu ve diğ. (2020) 2019-2021 için "toplanan" toplam e-atık miktarını tahmin etmiştir. Bu sınırlı literatüre bakıldığında, Türkiye'de e-atık miktarı tahmini kapsayan bütünsel bir çalışmanın olmadığı görülmektedir. Aynı zamanda hem geçmiş potansiyelin miktarca belirlenmesi hem de gelecek perspektifinin oluşturulması gerekmektedir. Son yıllarda birçok tahmin çalışmasının öznesi olan ve teknoloji yarışının en hızlı nüfuz ettiği ürün olan cep telefonlarının, Türkiye'de yaygın kullanıldığı bilinmektedir. Hacmine ve ağırlığına oranla yüksek miktarda malzeme potansiyeline sahip olan ve kullanıcıların satın alırken gelirlerine oranla yüksek miktarda ödeme yaptığı cep telefonlarının oluşturduğu e-atık miktarının tahmini ve geri kazanımı için strateji geliştirilmesi elzemdir. Aynı zamanda bu tez kapsamının bir sınırlılığı olan veri kaydı problemi nedeniyle, en sağlıklı veri kümesine cep telefonu satış verileri için ulaşmak mümkün olduğundan, bu ürünün tahmin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, e-atıkların ve bu çalışmada uygulaması yapılan ACT'lerin Türkiye için malzeme ve getiri potansiyeli bilinmemekte ve çalışmaların çoğu DE'yi dikkate almamaktadır.

Tablo 2.4:Türkiye e-atık tahmini literatürü

Kriter/Çalışma	Öztürk (2014)	Yazici ve diğ. (2014)	Salihoglu ve Kahraman (2016)	Kececi ve diğ. (2018)	Kazancoglu ve diğ. (2020)
Miktar belirleme	✓	✓	✓	✓	
Cep telefonu	✓		✓		
Ürün ömür dağılımı		✓			
Satış verisi		✓			
Döngüsel ekonomi					✓
Malzeme analizi					
Türkiye geneli	✓	✓			✓
Gelecek tahmini					✓

3. LİTERATÜRDE MEVCUT E-ATIK TAHMİN MODELLERİ

Bu bölümde literatürde mevcut olan ve e-atık tahmininde sık kullanılan tahmin modelleri yer almaktadır. Tezin ilerleyen bölümlerinde ise yeni önerilen ve geliştirilen modeller yer aldığından, bu bölümde mevcutta e-atık tahmininde yaygın kullanılan girdi-çıktı analizine dayalı modellere detaylıca yer verilmiştir. Yöntemlerin güçlü, zayıf ve gelişmeye açık yönleri tartışılmıştır. Aynı zamanda tezin bu bölümü 2019 yılında bir kitap bölümü olarak yayınlanmıştır (Bogar ve diğ. 2019).

3.1 Satış Yöntemi (The Sales Method)

Satış yöntemi bir yılda üretilen e-atık miktarının o yılda gerçekleştirilen satış miktarına eşit olduğu varsayar. Bir başka deyişle bir ürünün e-atık olabilmesi için, yerine yenisinin alınması gerekmektedir. Bu nedenle yöntemin doymuş pazarlarda kullanımı daha uygun olup, tahmin için Denklem (3.1)'de gösterildiği gibi sadece satış verisine ihtiyaç duyar:

$$E - waste_t = S_t \quad (3.1)$$

$E-waste_t$ t yılında üretilen e-atık miktarını, S_t ise t yılında gerçekleşen satış miktarını göstermektedir. Satış yöntemi literatürde en az sıklıkta kullanılan yöntem olup, "Approximation 2" olarak da isimlendirilmektedir (Crowe ve diğ. 2003; Unep 2007).

Örnek: A ürünü için satış verileri Tablo 3.1'de verilmiştir. Tablo 3.2 ise Satış Yöntemi' ne göre oluşan e-atık miktarını göstermektedir.

Tablo 3.1: A ürünü için satış verileri ($\times 10^3$ adet/yıl)

	Yıl	1	2	3	4	5	6	7
A ürünü	Satış	1.515	1.746	2.688	2.647	2.951	2.878	2.507
	Yıl	8	9	10	11	12	13	14
	Satış	2.576	2.643	2.932	3.006	3.480	3.033	2.965

Tablo 3.2: A ürünü için Satış Yöntemi ile elde edilen sonuçlar ($\times 10^3$ adet/yıl)

	Yıl	1	2	3	4	5	6	7
A ürünü	e-atık	1.515	1.746	2.688	2.647	2.951	2.878	2.507
	Yıl	8	9	10	11	12	13	14
	e-atık	2.576	2.643	2.932	3.006	3.480	3.033	2.965

3.2 Pazar Tedarik-Basit Gecikme Yöntemi (Market Supply- Simple Delay Method)

Lohse ve diğ. (1998) tarafından Pazar Tedarik Yöntemi olarak adlandırılan bu yöntem Nathani ve Arnsberg (1998) tarafından “Phase Method” olarak da isimlendirilmiş olup, yöntemin literatürde çeşitli varyasyonları bulunmaktadır: Basit gecikme, Dağılımlı Gecikme, Carnegie Mellon. Pazar tedarik yönteminin ilk önerilen temel formu Denklem (3.2)’de verildiği gibidir:

$$E - waste_t = S_{t-L} + RU_{t-L_r} \quad (3.2)$$

L ürünün ilk kullanım ömrü, L_r ikinci el kullanılan ürünün ömrü ve RU ikinci el kullanılan ürün miktarını göstermek üzere, “ $t-L$ ” yıl önceki satış miktarı ile “ $t-L_r$ ” yıl önce ikinci defa kullanılmaya başlanan ürün miktarının toplamı t yılında üretilen atık miktarını vermektedir.

Basit gecikme (Simple Delay) bir ürünün ilk kullanım ömrünü tamamladığında e-atık olduğu varsayar ve Denklem (3.2)’ye benzer şekilde Denklem (3.3) ’te verildiği gibi hesaplanır:

$$E - waste_t = S_{t-L} \quad (3.3)$$

Örnek: A ürününün ömrü (L) 10 yıl varsayıldığında, Tablo 3.1’de yer alan satış verileri dikkate alındığında Denklem (3.3)’e göre hesaplanan e-atık miktarları Tablo 3.3’te yer almaktadır.

Tablo 3.3: A ürünü için Basit Gecikme yöntemi ile elde edilen sonuçlar ($\times 10^3$ adet/yıl)

	Yıl	10	11	12	13	14	15	16
A ürünü	e-atık	1.515	1.746	2.688	2.647	2.951	2.878	2.507
	Yıl	17	18	19	20	21	22	23
	e-atık	2.576	2.643	2.932	3.006	3.480	3.033	2.965

3.3 Dağılımlı Gecikme Yöntemi (The Distribution Delay Method)

Bu yöntem, değerlendirme yılıyla ilişkili eskime oranlarını dikkate alır. Yöntem geçmiş satış verilerine ve ürün ömür dağılımına ihtiyaç duyar. Bir yılda üretilen toplam e-atık miktarı Denklem (3.4)'e göre hesaplanır:

$$E - waste_t = \sum_{n=n_0}^t S_n f_{n,t} \quad (3.4)$$

S_n n yılındaki satış miktarını, $f_{n,t}$ ise n yılında satılan bir ürünün t yılındaki eskime oranını ifade etmektedir. n_0 ürünün pazara girdiği/ilk satıldığı yılı göstermekte olup, bu denklemin çıktısı bir t yılı için farklı yıllarda satılıp o yılda eskimiş ürünlerin toplamıdır.

Örnek: A ürününe ait ürün ömür dağılımı Tablo 3.4'te verildiği şekilde olsun. Yine aynı satış verileri kullanılarak Denklem (3.4)'e göre yapılan detaylı hesaplama sonuçları ve oluşan toplam e-atık miktarları Tablo 3.5'te yer almaktadır.

Tablo 3.4: A ürününe ait ürün ömür dağılımı

Ürün/Ürün ömrü (yıl)	8	9	10	11	12
A ürünü	0,05	0,20	0,50	0,20	0,05

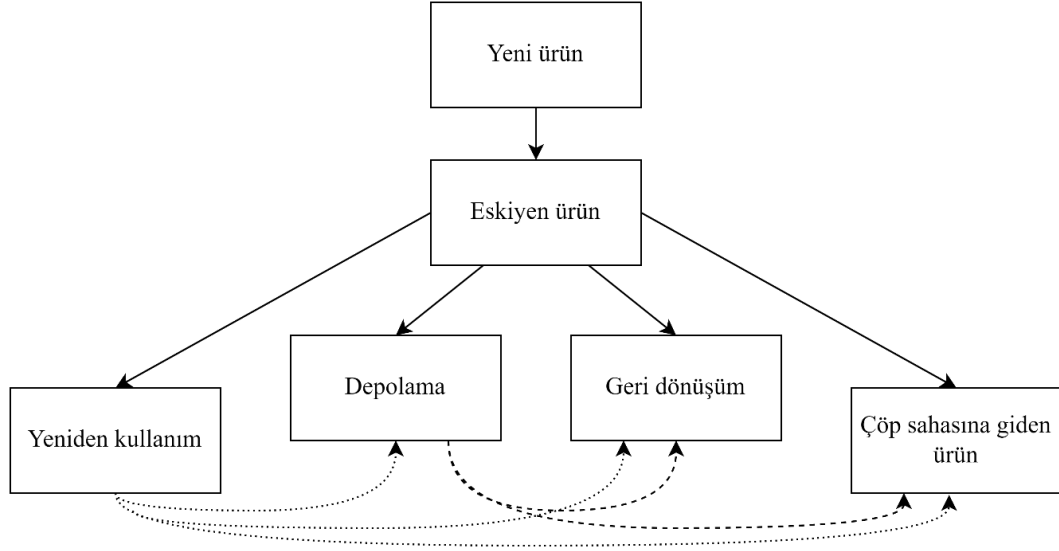
Tablo 3.5: Dağılımlı Gecikme Yöntemi ile elde edilen sonuçlar ($\times 10^3$ adet)

Yıl	Satış ($\times 10^3$ adet)	E-atık miktarı ($\times 10^3$ adet/yıl)							
		13	14	15	16	17	18	19	20
1	1.515	76							
2	1.746	349	87						
3	2.688	1.344	538	134					
4	2.647	529	1.324	529	132				
5	2.951	148	590	1.476	590	148			
6	2.878		144	576	1.439	576	144		
7	2.507			125	501	1.253	501	125	
8	2.576				129	515	1.288	515	129
9	2.643					132	529	1.322	529
10	2.932						147	586	1.466
11	3.006							150	601
12	3.480								174
	Toplam	2.446	2.683	2.840	2.791	2.624	2.609	2.698	2.899

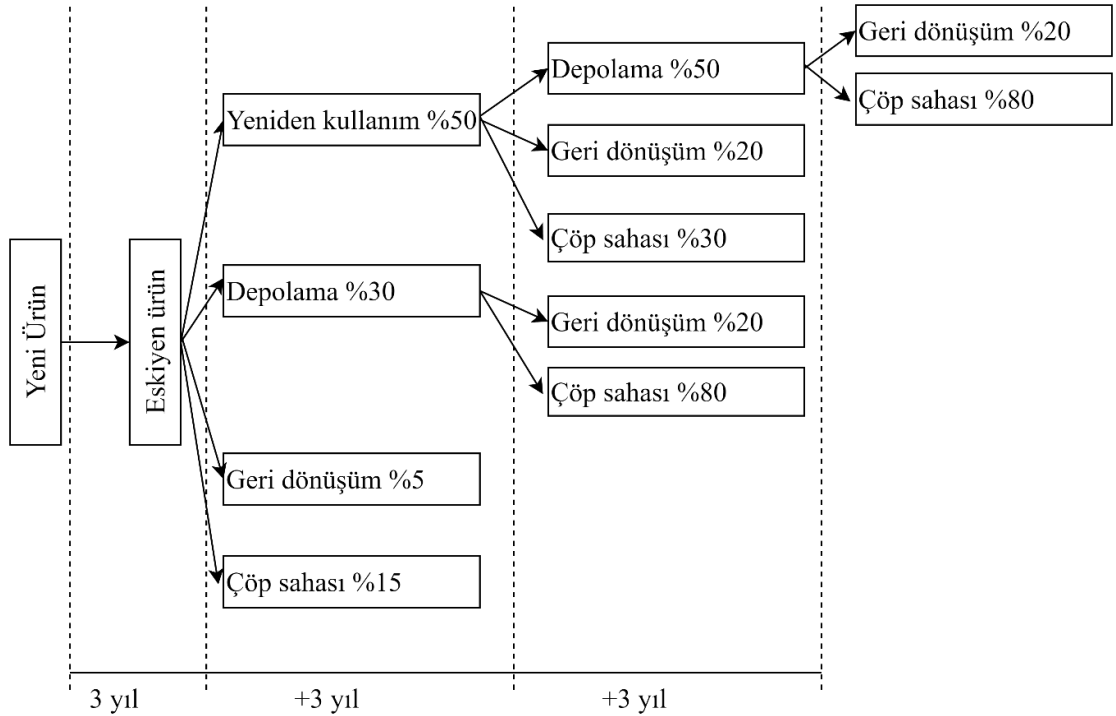
3.4 Carnegie Mellon Yöntemi

Carnegie Mellon veya literatürdeki diğer adıyla “Kütle Dengesi (Mass Balance) Yöntemi”, 1991 yılında Carnegie Mellon Üniversitesi’nde bir çalışmada ortaya çıkmış ve Matthews ve diğ. (1997) tarafından güncellenerek literatüre kazandırılmıştır. Model bir ürünün satışından sonra karşılaşılabileceği seviyeleri dikkate alarak bir tahmin yapmaktadır. Satılan bir ürün belirli bir ürün ömrünün (bu çalışmada ilk kullanım ömrü) sonuna ulaştığında eskimiş olur. Eskimiş bir ürün yeniden kullanım (RU), depolama (ST), geri dönüşüm (R) ve çöpe atılma (LF) olmak üzere dört seçeneğe sahiptir. Eskiye ürünler belirli oranlarda bu süreçlere girerler (elden çıkarma, ayrışma yüzdesi). Aynı şekilde yeniden kullanılmış bir ürün de ya depolanır ya geri dönüştürülür ya da çöpe atılır. Tüm bu süreçler Carnegie Mellon yöntemi ile analiz edilip, her bir seviyede ayrışma miktarları belirlenerek, belirli bir yıldaki çöp, geri dönüşüm, depolama ve yeniden kullanım miktarları farklı seviyelerdeki ürün ömürleri olan ilk kullanım (L), yeniden kullanım (L_r) depolama (L_s) verilerine dayalı olarak tahmin edilebilmektedir. CM yönteminde ürün ömrü sabit alınmaktadır. Aynı

şekilde yeniden kullanım ve depolama içinde belirli süreler vardır ve bu ürünün satış yılı ne olursa olsun sabittir. Model kısaca Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verildiği gibi görselleştirilmiştir.



Şekil 3.1: CM yönteminde ürün yaşam sonu evreleri (Matthews ve diğ. 1997)



Şekil 3.2: CM yöntemi ve ürün yaşam sonu evrelerine göre ayrışmalar (Peralta ve Fontanos 2006)

CM yönteminin zor tarafı ürünün her bir yaşam evresinin ve bu evredeki ömürlerinin analiz edilmesindeki güçlüktür. Denklemler (3.5)-(3.9)'da farklı seviyelerde ortaya çıkan ürün miktarlarına ilişkin eşitlikler verilmiştir:

$$O_i = Obsolete_i = Sales_{i-L} \quad (3.5)$$

$$RU_i = O_i P_1 \quad (3.6)$$

$$ST_i = O_i P_2 + RU_{i-L_r} P_5 \quad (3.7)$$

$$R_i = O_i P_3 + ST_{i-L_s} P_8 + RU_{i-L_r} P_6 + RU_{i-L_r-L_s} P_5 P_8 \quad (3.8)$$

$$LF_i = O_i P_4 + ST_{i-L_s} P_9 + RU_{i-L_r} P_7 + RU_{i-L_r-L_s} P_5 P_9 \quad (3.9)$$

$P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9$ sırasıyla eskiiyip yeniden kullanılan (RU), eskiiyip depolanan (ST), eskiiyip geri dönüştürülen (R), eskiiyip çöpe atılan (LF), yeniden kullanılıp depolanan (RUST), yeniden kullanılıp geri dönüştürülen (RUR), yeniden kullanılıp çöpe atılan (RULF), depolanıp geri dönüştürülen (STR) ve depolanıp çöpe atılan (STLF) ürünlerin elden çıkarılma yüzdesini göstermektedir. Denklem (3.5) bir ürünün ilk kullanım ömrü sona erdiğinde eskidiğini ifade etmektedir. Denklem (3.6)'ya göre eskiiyen ürünler P_1 oranıyla yeniden kullanılabilir. Denklem (3.7) ürünlerin ilk veya yeniden kullanım sonrası depolanan miktarını, Denklem (3.8) ve Denklem (3.9) ise sırasıyla ürünlerin farklı aşamalardan geçtikten sonra geri dönüştürülme veya çöpe gitme miktarlarını göstermektedir.

Tablo 3.6'da ise Carnegie Mellon yöntemi bir örnek üzerinden tablolştırılmıştır. Her bir yılda gerçekleşen satışlar için farklı bir renk tanımlanmıştır. Bir renge ait farklı renk tonları ise ürün yaşam sonu evrelerini ifade etmektedir. Bu renk tonları koyudan açığa doğru sırasıyla eskiiyen, yeniden kullanılan, depolanan, geri dönüşüme dahil olan ve çöpe giden e-atıkları ifade etmektedir. Toplam e-atık miktarının olduğu bölüm incelenecek olursa, herhangi bir yılda oluşan e-atıkların hangi yılda gerçekleşen satıştan kaynaklandığı net bir şekilde görülmektedir. Aynı zamanda geri dönüştürülen ya da çöpe giden e-atıkların, hangi ürün yaşam sonu evrelerinden geçtiğini görmek de mümkündür.

Tablo 3.6: CM yöntemi ile farklı satış yıllarına ait e-atık oluşumu

Yıl	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Satış (L=3)	Satış			Eskime								
Yeniden kullanım (L _r =3)				RU								
Depolama (L _s =3)				ST			RUST					
Geri dönüşüm				R			RUR, STR			RUSTR		
Çöpe giden				LF			RULF, STLF			RUSTLF		
Satış (L=3)		Satış			Eskime							
Yeniden kullanım (L _r =3)					RU							
Depolama (L _s =3)					ST			RUST				
Geri dönüşüm					R			RUR, STR			RUSTR	
Çöpe giden					LF			RULF, STLF			RUSTL	
Satış (L=3)			Satış			Eskime						
Yeniden kullanım (L _r =3)						RU						
Depolama (L _s =3)						ST			RUST			
Geri dönüşüm						R			RUR, STR			RUSTR
Çöpe giden						LF			RULF, STLF			RUSTLF
Toplam e-atık				R	R	R	RUR, STR	RUR, STR	RUR, STR	RUSTR	RUSTR	RUSTR
				LF	LF	LF	RULF, STLF	RULF, STLF	RULF, STLF	RUSTLF	RUSTLF	RUSTLF

Örnek: A ürününe ait ayrışma yüzdeleri Tablo 3.7’de verilmiş olup, ilk kullanım süresi $L=10$; yeniden kullanım süresi $L_r=3$; ve depolama süresi $L_s=3$ olarak varsayalım (Peralta ve Fontanos 2006). Farklı ürün yaşam sonu evrelerine göre ayrışan miktarlar Tablo 3.8’de, toplam oluşan atık miktarları ise Tablo 3.9’da verildiği şekildedir.

Tablo 3.7: Eskiye ürünlerin farklı yaşama evrelerine göre ayrışma yüzdeleri (Peralta ve Fontanos 2006)

Kod	Ayrışma tipi	Oran (%)
1	Eskiyip yeniden kullanılan	50
2	Eskiyip depolanan	30
3	Eskiyip çöp olan	15
4	Eskiyip geri dönüştürülen	5
5	Yeniden kullanılıp geri dönüştürülen	20
6	Yeniden kullanılıp depolanan	50
7	Yeniden kullanılıp çöp olan	30
8	Depolanıp geri dönüştürülen	20
9	Depolanıp çöp olan	80

Tablo 3.9: A ürünü için farklı yaşam evrelerine göre oluşan e-atık ve ayrışma miktarları ($\times 10^3$ Adet)

Yıl	Satış	Eskimiş	Yeniden kullanım	Depolama	Geri dönüşüm	Çöpe atılan
1	1.515					
2	1.746					
3	2.688					
4	2.647					
5	2.951					
6	2.878					
7	2.507					
8	2.576					
9	2.643					
10	2.932					
11	3.006	1.515	757	454	76	227
12	3.480	1.746	873	524	87	262
13	3.033	2.688	1.344	806	134	403
14	2.965	2.647	1.324	1.173	375	988
15		2.951	1.476	1.322	427	1.123
16		2.878	1.439	1.535	574	1.480
17		2.507	1.253	1.414	625	1.711
18		2.576	1.288	1.511	688	1.886
19		2.643	1.322	1.513	727	2.057
20		2.932	1.466	1.506	680	1.947
21		3.006	1.503	1.546	710	2.046
22		3.480	1.740	1.705	741	2.129
23		3.033	1.517	1.643	746	2.100
24		2.965	1.482	1.641	758	2.132
25				870	689	1.886
26				758	632	1.769
27				741	625	1.757
28					174	696
29					152	607
30					148	593

3.5 Zaman Adımı Yöntemi (The Time Step Method)

Zaman adımı veya diğer adıyla “Yeni Satışlar” yöntemi satış ve kullanımdaki ürün miktarı (stok) verilerini kullanır. Bir yıldaki e-atık miktarı, satış miktarından son ardışık iki yıldaki stok değişim miktarının farkının çıkarılmasıyla hesaplanır. $Stock_t$ t yılındaki, $Stock_{t-1}$ ise bir önceki yıla ait kullanımdaki ürün miktarını göstermek üzere; Denklem (3.10)’da t yılında üretilen e-atık miktarı verilmiştir:

$$E - waste_t = S_t - (Stock_t - Stock_{t-1}) \quad (3.10)$$

Örnek: B ürünü için 2012-2017 yıllarına ait satış ve stok bilgileri (Bilgi Teknolojileri Kurumu (2007-2015)) Tablo 3.10’da verildiği gibidir. Denklem (3.10) kullanılarak hesaplanan e-atık miktarları ise Tablo 3.11’de gösterilmektedir.

Tablo 3.10: B ürününe ait satış ve stok verileri

Yıl	Stok (Adet/yıl)	Satış (Adet/yıl)
2012	83.389.007	17.741.838
2013	88.184.356	20.119.184
2014	91.368.738	16.187.984
2015	94.042.496	19.029.353
2016	97.049.362	20.225.608
2017	99.413.002	22.289.997

Tablo 3.11: B ürününe ait Zaman Adımı Yöntemi ile elde edilen sonuçlar (Adet/yıl)

Yıl	Stok	Stok Değişimi	Satış	E-atık
2012	83.389.007			
2013	88.184.356	4.795.349	20.119.184	15.323.835
2014	91.368.738	3.184.383	16.187.984	13.003.601
2015	94.042.496	2.673.757	19.029.353	16.355.596
2016	97.049.362	3.006.866	20.225.608	17.218.742
2017	99.413.002	2.363.641	22.289.997	19.926.356

3.6 Tüketim ve Kullanım Yöntemi (The Consumption and Use Method)

Tüketim ve Kullanım (C&U) yöntemi e-atık tahmininde literatürde en sık kullanılan yöntemlerden biridir. “Batch Leaching” ve “Approximation 1” isimleriyle de kullanılan yöntem Lohse ve diğ. (1998) tarafından önerilmiştir. Widmer ve diğ. (2005) ile Robinson (2009)’un çalışmalarında kullandıkları bu yöntem literatürde sıklıkla kaynak gösterilmektedir. Yöntem ürün ömrü (L), hane halkı sayısı (H_t) ve bir kişi için doyum seviyesi (saturation level) (Nh_t) verilerini kullanır. Yöntemin ana amacı, stok miktarını ürün ömrüne bölerek ortalama bir e-atık miktarı bulmaktır. Stok miktarı $Stock_t$ hane halkı sayısının her bir kişinin doyum seviyesine çarpımı ile elde edilir. Doyum seviyesi ise ürüne sahip olan hane halkı yüzdesini ifade eder. Dört kişilik bir ailenin evinde 1 adet çamaşır makinesi, 4 adet cep telefonu varsa; doyum seviyesi çamaşır makinesi için %25, cep telefonu için ise %100’dür. Denklem (3.11) ortalama atık miktarını göstermektedir. Denklem (3.12) ise W ürünün ağırlığını göstermek üzere, Robinson (2009) çalışmasında önerdiği ağırlık cinsinden atık miktarı yer almaktadır.

$$E - waste = \frac{H_t \cdot Nh_t}{L} = \frac{Stock_t}{L} \quad (3.11)$$

$$E - waste = \frac{Stock_t \cdot W}{L} \quad (3.12)$$

Örnek: Stok verileri Tablo 3.10’da verilmiş olan B ürünü için, Tüketim ve Kullanım Yöntemi ile ürün ömrünün $L = 2, 3$ ve 5 yıl olduğu senaryolarda oluşabilecek e-atık miktarları Tablo 3.12’de yer almaktadır.

Tablo 3.12: B ürünü için Tüketim ve Kullanım Yöntemi ile oluşan e-atık miktarları (Adet/yıl)

Yıl	Stok	$L = 2$ yıl	$L = 3$ yıl	$L = 5$ yıl
2012	83.389.007	41.694.504	27.796.336	16.677.801
2013	88.184.356	44.092.178	29.394.785	17.636.871
2014	91.368.738	45.684.369	30.456.246	18.273.748
2015	94.042.496	47.021.248	31.347.499	18.808.499
2016	97.049.362	48.524.681	32.349.787	19.409.872
20170	99.413.002	49.706.501	33.137.667	19.882.600

3.7 Genel Amaçlı Tahmin Modelleri

E-atık özelinde kullanılan ve daha çok girdi-çıkıtı analizine dayalı tahmin yöntemleri dışında, literatürde mevcut olan klasik tahmin yöntemleri de e-atık tahmininde kullanılmaktadır.

Tahmin yöntemleri niteliksel ve niceliksel yöntemler olmak üzere iki genel kategoriye ayrılabilir. Delphi yöntemleri, pazar araştırması gibi nitel tahmin yöntemleri öznel iken, nicel yöntemler geçmiş verileri kullanmaktadır. Zaman serileri analizleri ise tahmin için en yaygın kullanılan nicel yöntemlerdir. Tez kapsamında da hangi tahmin yönteminin gerçek e-atık miktarına yakınsadığını daha doğru bir şekilde derinlemesine araştırmak için bazı doğrusal ve doğrusal olmayan tahmin modelleri kullanılmıştır.

Zaman serisine dayalı klasik tahmin yöntemlerine ilave olarak, “yeni nesil tahmin yöntemi” olarak adlandırabileceğimiz gri modeller de son yıllarda e-atık tahmininde kullanılmaktadır. Belirsizlik ve az veri olduğu durumlarda bu yöntemi kullanmanın avantajlı olduğu bilindiğinden, e-atık tahmin problemlerinde iyi sonuçlar veren gri modellerin daha sık kullanılacağı öngörülmektedir. Bu yöntemler ve uygulamaları Bölüm 5 ve Bölüm 6’da daha detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

3.8 Literatürde ve Uygulamada E-atık Tahmininde Kullanılan Yöntemlerin Tartışılması

Hem e-atık tahmini hem de genel tahmin problemlerinde kullanılan tahmin yöntemleri incelendiğinde her bir yöntemin farklı avantajları ve dezavantajları mevcuttur.

Girdi-çıkıtı analizine dayalı yöntemler, ürünlerin satış, stok, ürün ömrü gibi verilerini kullanırlar. Bu yöntemlerin avantajı piyasaya ne kadar ürün sürüldüğü verisini kullandıkları için, ürün ömür profiline göre bu ürünlerin ne zaman hangi ürün yaşam sonu evresinden geçip atığa dönüşeceklerini kestirebilmeleridir. Aynı zamanda

geçmişte üretilen, artık satışı olmayan ancak piyasada kullanıldığı bilinen ürünlerin takibinde, özellikle malzeme akış analizi çalışmalarında bu yöntemler oldukça kullanışlıdır. Dezavantajı ise, ürün ömür profilinin mevcut olup olmaması ve ürün satış verilerinin sağlıklı kayıt altında olup olmamasıdır. Ürün ömür profilinin %100 doğru olarak belirlenmesi mümkün değildir. Bugün satılan bir ürünün ne zaman kullanımdan çıkacağı, atığa dönüşeceği ya da geri dönüşüm geri kazanım sürecine gireceği birçok belirsizlik barındırır. Ürün bozulacak mı, ne zaman bozulacak, ürünü satın alan kişinin ürünü kullanma davranışı nasıl olacak? Müşteri ürünü bozuluncaya kadar mı kullanacak, yoksa bir üst modeli çıkıncaya kadar mı? Bozulunca tamir mi ettirecek, ikinci el olarak mı satacak, depolayacak mı, geri dönüşüme mi verecek yoksa çöpe mi atacak? Bu ve benzeri birçok sorunun cevabını net olarak vermek mümkün olmasa da uygulamalarda ve literatürde genellikle anket ve saha çalışmalarına dayalı bir ürün ömür profili oluşturulmaktadır. Aynı zamanda bu yöntemlerin bir dezavantajı da gelecek tahmini yapamamalarıdır.

Genel amaçlı tahmin modelleri ise literatürde çok farklı alanlarda çok iyi sonuçlar üretmektedir. Özellikle gelecek tahmini yapmak için bu yöntemlerin kullanılması kaçınılmazdır. Ancak bu yöntemlerin e-atık problemlerinde uygulamak, e-atık verileri günümüzde henüz yeteri kadar kayıtlı olmadığı için çok da mümkün olmamıştır. Yine de bu yöntemler, satış, nüfus, kullarımdaki ürün miktarı vb. girdilerin gelecek için tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Böylelikle, tahmin edilen bu veriler kullanılarak girdi-çıkıtı analizi yöntemleri yardımıyla e-atık oluşumunun tahmin edilmesi mümkün olmaktadır. İlerleyen zamanlarda e-atık veri kayıtlarının artacağı düşünülürse bu yöntemler doğrudan e-atık tahmininde iyi sonuçlar üretmek üzere kullanılabilirlerdir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında e-atık tahmini için farklı materyaller kullanılarak yöntem ve yaklaşımlar önerilmiştir. E-atık tahmin modelleri farklı yapıda verileri kullanmakta, farklı amaçlara hizmet etmektedir. Bu nedenle bu bölümde tez kapsamında önerilen modeller ve yaklaşımlar için genel bir çerçeve çizilmiş ve kullanılan yöntemler özetlenmiştir. Yöntemlerin detayları Bölüm 5, Bölüm 6 ve Bölüm 7’de kapsamlı bir şekilde anlatılmıştır.

Tez kapsamında e-atık tahmini için üç yöntem geliştirilerek kullanılmıştır. Birincisi, Geliştirilmiş Carnegie Mellon (GCM) yöntemi, ikincisi e-atık tahmini için sistematik bir tahmin yaklaşımı ve üçüncüsü ise trigonometri tabanlı ayırık bir gri model önerisidir. Sırasıyla yöntemlerin mikro ölçekten makro ölçeğe yayıldığı söylenebilir. Önerilen yöntemlerin sınırları kullandıkları verilere göre değişmektedir.

İlk olarak, önerilen GCM yöntemi girdi-çıktı analizine dayanan bir tahmin yöntemidir. Piyasaya sürülen ürün ya da satış miktar verisini kullanan bu yöntem, ürün ömür verisini de dikkate alarak gerçekleşen satışlara göre ürünlerin farklı yaşam evrelerine göre ayrışma miktarlarını hesaplar ve belirli bir yıl için oluşan e-atık miktarını tahminler. Bölüm 3.4’te anlatılan Carnegie Mellon yönteminden farklı olarak, önerilen GCM modeli ürün ömrünü sabit değil, değişken kabul eder. Bölüm 5’te önerilen GCM modelinin detayları yer almaktadır. Diğer girdi-çıktı analizini yöntemlerinde olduğu gibi, GCM yöntemi sadece veri kaydının olduğu yıllarda gerçekleşen satış miktarına dayalı olarak bir tahmin yapabilmekte, gelecek tahmini için kullanılamamaktadır.

İkincisi ise e-atık tahmini için önerilen sistematik tahmin yaklaşımıdır. Bu yaklaşım metodolojik olarak yeni bir yöntem kullanmıyor olsa da e-atık tahmin literatüründe kullanılan tahmin yöntemlerine bütünsel açıdan bakarak sistematik eksikliğe dayalı bir boşluğu doldurmaktadır. E-atık tahmininde veri kayıtlarının yetersizliği nedeniyle yapılan tahminlerin doğruluğunun sınanması büyük bir problemdir. Bölüm 3’te detaylandırılan ve satış, kullanımdaki ürün miktarı gibi verilerden hareketle belirli bir ürün ömrü ya da stok değişimine dayalı olarak gerçekleşen e-atık miktarını girdi-çıktı analizine dayalı yöntemlerle tahmin etmek mümkündür. Bu verilere ya da tahminlere dayalı gelecek tahmini yapılırken ise zaman

serisi analizleri kullanılmaktadır. Literatür analizinde genellikle tek bir zaman serisi yöntemine dayalı tahmin modelinin kullanıldığı görülmüştür. Ancak, e-atık veri kayıtlarının bulunmadığı bir ortamda, tek bir yöntem kullanarak gelecek tahmini yapmak büyük bir handikaptır. Çünkü dikkate alınan modelin, gerçekleşmiş e-atık oluşumunu ne kadar iyi modellediği ile ilgili bir kıyaslama yapılmamaktadır. Bu nedenle, bu tez kapsamında Bölüm 6'da hem girdi-çıkı analizini kullanan hem de gelecek tahmini yaparken birden fazla yöntemi değerlendirerek en iyi performans değerine sahip yöntemi seçen hibrit tahmin yaklaşımı önerilerek e-atık tahmin süreci sistematikleştirilmiştir. Önerilen yöntem Türkiye ACT tahmininde uygulanmış olup, satış verileri ile dinamik ürün ömrünü kullanmaktadır. Aynı zamanda oluşan ACT miktarına bağlı olarak da atık malzeme miktarları ve getiri potansiyelleri farklı senaryolarla tahmin edilmiş, sonuçlar döngüsel ekonomi bakış açısıyla değerlendirilmiştir.

Üçüncü ve son modelde ise, e-atık tahmini için Trigonometri Tabanlı Ayrık Gri Model (TBDGM (1,1)) önerilmiştir. E-atık tahmin literatürünün tarihsel gelişimi ve son yıllarda yapılan çalışmalar yeni ve farklı tahmin modellerinin e-atık tahmininde kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak e-atık veri kayıtları ile ilgili verilerin yetersizliği hala büyük bir problemdir. Verilerin az ve yetersiz olduğu şartlarda başarılı tahmin sonuçları üreten gri modeller e-atık tahmininde de iyi sonuçlar üretmektedir. Bu nedenle, tez kapsamında düzgün olmayan veri yapısına sahip olan e-atık oluşumu için bir TBDGM (1,1) modeli önerilmiştir. Model e-atık oluşum verilerini kullanarak e-atık tahmini yapmaktadır. Modelin amacı, Ayrık Gri Modelin (DGM) dezavantajlarını trigonometrik ifadelerle dayalı olarak azaltma ve sistemin daha iyi modellenmesini sağlayarak daha doğru tahmin sonuçları üretmektir. TBDGM (1,1) modeli aynı zamanda model parametrelerini meta sezgisel algoritma ile optimize ederek modelin doğruluğunu arttırmaktadır. Önerilen modelin doğruluğu Washington Eyaleti e-atık verileri ile literatürde elde edilen sonuçlara dayanarak sınanmış ve sonrasında Türkiye'de kayıt altına alınan e-atık verileri için de uygulanmıştır.

Tablo 4.1'de önerilen yöntem ve yaklaşımların özellikleri tahmin periyodu, kullanılan tahmin yönteminin türü ve kullanılan veri kaynağına göre özetlenmiştir.

Tablo 4.1: Tez kapsamında önerilen yöntem ve yaklaşımlar

Yöntem-Yaklaşım / Özellik	Tahmin Periyodu		Tahmin Yöntemi			Veri Kaynağı	
	Geçmiş	Gelecek	IOA	ZS	Hibrit	Satış	AEEE
GCM	✓		✓			✓	
Sistemik Tahmin Yaklaşımı	✓	✓			✓	✓	
TBDGM(1,1)		✓		✓			✓

5. GELİŞTİRİLMİŞ CARNEGIE MELLON (GCM) YÖNTEMİ

Bu bölümde literatürde mevcut olan Carnegie Mellon modeli geliştirilerek yeniden modellenmiştir. Tez kapsamında, CM yöntemi temel alınarak bir ürünün ürün ömrünün sabit olmadığı, farklı yıllarda farklı ömürlere sahip olabileceği varsayımıyla “Geliştirilmiş Carnegie Mellon (GCM) Yöntemi” önerilmiştir. Önerilen yöntem modellenirken, depolama ve yeniden kullanım sürelerinin de CM yönteminde olduğu gibi sabit değil, ürünün satıldığı yıla göre farklılık gösterme durumu dikkate alınmıştır.

“ i ” satış yılını, “ i_0 ” ürünün ilk satıldığı yılı (satış verilerinin elde edildiği ilk yıl), “ j ” tahmini yapılan yılı göstermek üzere, modele ait parametreler ve tahmini yapılacak olan değişkenler aşağıda verildiği gibidir:

- S_i : i yılında satılan ürün miktarı
 O_{ij} : i yılında satılıp, j yılında eskiyen ürün miktarı
 RU_{ij} : i yılında satılıp, j yılında yeniden kullanılan ürün miktarı
 ST_{ij} : i yılında satılıp, j yılında depolanan ürün miktarı
 R_{ij} : i yılında satılıp, j yılında geri dönüştürülen ürün miktarı
 L_{ij} : i yılında satılıp, j yılında çöpe atılan atık miktarı
 $\overline{O_j}$: j yılında eskiyen toplam ürün miktarı
 $\overline{RU_j}$: j yılında yeniden kullanılan toplam ürün miktarı
 $\overline{ST_j}$: j yılında depolanan toplam ürün miktarı
 $\overline{R_j}$: j yılında geri dönüştürülen toplam ürün miktarı
 $\overline{LF_j}$: j yılında çöpe atılan toplam ürün miktarı
 l_i : i yılında satılan ürünün ortalama ürün ömrü
 $l_{r,i}$: i yılında satılan ürünün ortalama yeniden kullanım süresi
 $l_{s,i}$: i yılında satılan ürünün ortalama depolanma süresi
 P_1, P_2, P_3, P_4 : Eskiyip yeniden kullanılan, eskiyip depolanan, eskiyip geri dönüştürülen ve eskiyip çöpe atılan ürünlerin elden çıkarılma yüzdesi

- P_5, P_6, P_7 : Yeniden kullanılıp depolanan, yeniden kullanılıp geri dönüştürülen ve yeniden kullanılıp çöpe atılan ürünlerin elden çıkarılma yüzdesi
- P_8, P_9 : Depolanıp geri dönüştürülen ve depolanıp çöpe atılan ürünlerin elden çıkarılma yüzdesi

$$O_{i,j} = S_j - l_j \quad \forall i, \forall j \quad i < j \quad (5.1)$$

$$RU_{i,j} = O_{i,j}P_1 \quad \forall i, \forall j \quad i < j \quad (5.2)$$

$$ST_{i,j} = O_{i,j}P_2 + RU_{i,j-l_{r,i}}P_5 \quad \forall i, \forall j \quad i < j \quad (5.3)$$

$$R_{i,j} = O_{i,j}P_3 + ST_{i,j-l_{s,i}}P_8 + RU_{i,j-l}P_6 + RU_{i,j-l_{r,i}-l_{s,i}}P_5P_8 \quad \forall i, \forall j \quad i < j \quad (5.4)$$

$$L_{i,j} = O_{i,j}P_4 + ST_{i,j} - l_{s,i}P_9 + RU_{i,j-l_{r,i}}P_7 + RU_{i,j-l_{r,i}-l_{s,i}}P_5P_9 \quad \forall i, \forall j \quad i < j \quad (5.5)$$

$$\bar{O}_j = \sum_{i=i_0}^j O_{i,j} \quad \forall j \quad (5.6)$$

$$\overline{RU}_j = \sum_{i=i_0}^j RU_{ij} \quad \forall j \quad (5.7)$$

$$\overline{ST}_j = \sum_{i=i_0}^j ST_{i,j} \quad \forall j \quad (5.8)$$

$$\overline{R}_j = \sum_{i=i_0}^j R_{ij} \quad \forall j \quad (5.9)$$

$$\overline{LF}_j = \sum_{i=i_0}^j L_{i,j} \quad \forall j \quad (5.10)$$

Eşitlik (5.1) i . yılda satılıp j . yılda eskleyen ürün miktarının, ürün ömrü kadar önceki yılda satılan ürün miktarına eşit olduğu göstermektedir. i . yılda satılıp, j yılında eskimiş olan ürünlerin yeniden kullanılan miktarı, i . yılda satılıp j . yılda eskimiş olan ürün miktarı ile eskimiş ürünlerin yeniden kullanım elden çıkarılma yüzdesi ile çarpımına eşittir (Denklemler (5.2)). i yılında satılmış ürünler için j yılında depolanan ürün miktarı ise, ya j yılında eskieyip depolanan ürün miktarına ya da j yılından yeniden kullanım süresi kadar yıl önce yeniden kullanılmaya başlanmış ürünlerin, j . yılında

depolanmak üzere elden çıkarılma miktarına eşittir (Denklem (5.3)). i yılında satılıp j yılında geri dönüştürülen ürün, o yıl eskimiş olabilir, eskimiş yeniden kullanılmış dönüştürülüyor olabilir, eskimiş depolanmış dönüştürülüyor olabilir ya da eskimiş yeniden kullanılmış depolanmış dönüştürülüyor olabilir. Denklem (5.4), i yılında satılmış bir ürünün j yılı için bahsedilen geri dönüşüm miktarları toplamını ifade etmektedir. Aynı durum çöpe atılan ürün miktarı için de geri dönüşüm miktarı hesabında olduğu gibi geçerlidir (Denklemler (5.5) ve (5.6)). Bir j yılında eskiyen ürün miktarı, herhangi bir yılda satılıp j yılında eskiyen ürün miktarlarının toplamına eşittir (Denklem (5.7)). Her j yılında toplam depolanan, yeniden kullanılan, geri dönüştürülen ve çöpe atılan toplam miktarlar da sırasıyla Denklem (5.8), (5.9) ve (5.10)'da verildiği gibidir.

Önerilen GCM yöntemi Tablo 5.1'de görselleştirilmiştir. CM yönteminde olduğu gibi yine her bir yılda gerçekleşen satışlar için farklı bir renk tanımlanmış olup, bir renge ait farklı tonlar ise ürün yaşam sonu evrelerini ifade etmektedir. Bu tonlar yine koyudan açığa doğru sırasıyla eskiyen, yeniden kullanılan, depolanan, geri dönüşüme dahil olan ve çöpe giden e-atıkları ifade etmektedir. Daha önce CM yöntemi için Tablo 3.6'da oluşan e-atıklardan farklı olarak, GCM yöntemine göre herhangi bir yılda farklı yıllarda gerçekleşen satışlardan kaynaklanan e-atıklar olduğu görülmektedir. Bu farklılıkların nedeni, GCM yönteminin modelleme yaparken bir ürüne ait kullanım, yeniden kullanım ve depolama ömürlerinin satış yılına göre farklı olabilmesi durumunu dikkate almasıdır.

Tablo 5.1: GCM yöntemi ile farklı satış yıllarına ait e-atık oluşumu

Yıl	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Satış (L=3)	Satış			Eskime								
Yeniden kullanım (L _r =3)				RU								
Depolama (L _s =3)				ST			RUST					
Geri dönüşüm				R			RUR, STR			RUSTR		
Çöpe giden				LF			RUL, STLF			RUSTLF		
Satış (L=2)		Satış		Eskime								
Yeniden kullanım (L _r =2)				RU								
Depolama (L _s =1)				ST		RUST						
Geri dönüşüm				R	STR	RUR	RUSTR					
Çöpe giden				LF	STL	RUL	RUSTL					
Satış (L=2)			Satış	Eskime								
Yeniden kullanım (L _r =1)				RU								
Depolama (L _s =1)				ST	RUST							
Geri dönüşüm				R	RUR, STR	RUSTR						
Çöpe giden				LF	RUL, STL	RUSTL						
Toplam e-atık				R	STR	RUR	RUR, STR			RUSTR		
				LF	STL	RULF	RUL, STLF			RUSTLF		
				R	R	RUR, STR	RUSTR					
				LF	LF	RULF, STLF	RUSTLF					
							RUSTR					
							RUSTLF					
Yıl	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

- eskiyip yeniden kullanılan (RU), eskiyip depolanan (ST), eskiyip geri dönüştürülen (R), eskiyip çöpe atılan (LF), yeniden kullanılıp depolanan (RUST), yeniden kullanılıp geri dönüştürülen (RUR), yeniden kullanılıp çöpe atılan (RULF), depolanıp geri dönüştürülen (STR), depolanıp çöpe atılan (STLF)

GCM modeli Excel-VBA'da kodlanmış, Peralta ve Fontanos (2006)'un çalışmalarında kullandıkları veriler kullanılarak CM aynı sonuçlar elde edilmiş, kodun

doğruluğu test edilmiştir (ürün ömrünün sabit olması durumu). GCM yöntemi ile Tablo 3.7’de Carnegie Mellon yönteminde kullanılan ayrışma yüzdeleri aynı şekilde dikkate alınmıştır. Tablo 5.2’de bu çalışmada dikkate alınan varsayıma dayalı ürün ömürleri yer almaktadır. Farklı yaşam evrelerine ait ürün miktarları ve oluşan e-atık miktarlarına ait sonuçlar ise Tablo 5.3’te verilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, ürün ömürlerinin sabit değil satış yılına göre farklı olarak dikkate alınması, klasik Carnegie Mellon yöntemine göre daha farklı sonuçlar üretmektedir.

Tablo 5.2: Yıllara göre GCM için güncellenen ürün ömürleri Peralta ve Fontanos (2006)’tan uyarlanan)

Ürün Ömrü	1	2	3	4	5	6	7
L_i	10	10	10	10	9	9	9
$L_{r,i}$	5	5	5	5	4	4	4
$L_{s,i}$	3	3	3	3	3	3	3
Ürün Ömrü	8	9	10	11	12	13	14
L_i	9	8	8	8	8	8	8
$L_{r,i}$	4	3	3	3	3	3	3
$L_{s,i}$	3	2	2	2	2	2	2

Tablo 5.3: Önerilen GCM yöntemine göre e-atık tahmin sonuçları

Yıl	Satış	Eskimiş	Yeniden kullanım	Depolama	Geri dönüşüm	Çöpe atılan
1	1.515					
2	1.746					
3	2.688					
4	2.647					
5	2.951					
6	2.878					
7	2.507					
8	2.576					
9	2.643					
10	2.932					
11	3.006	1.515	757,5	455	76	227
12	3.480	1.746	873	524	87	262
13	3.033	2.688	1.344	806	134	403
14	2.965	5.598	2.799	1.679	371	1.203
15		2.878	1.439	863	249	851
16		2.507	1.253,5	1.131	438	2.879,24
17		5.219	2.609,5	2.002	771	3.831,91
18		2.932	1.466	2.289	883	904,741
19		3.006	1.503	2.283	1.088	878,248
20		3.480	1.740	2.332	1.107	2.966
21		3.033	1.516,5	2.287	1.165	3.130
22		2.965	1.482,5	1.641	1.066	3.364
23				870	802	2.338
24				758	760	2.283
25				741	471	1.141
26					152	607
27					148	593

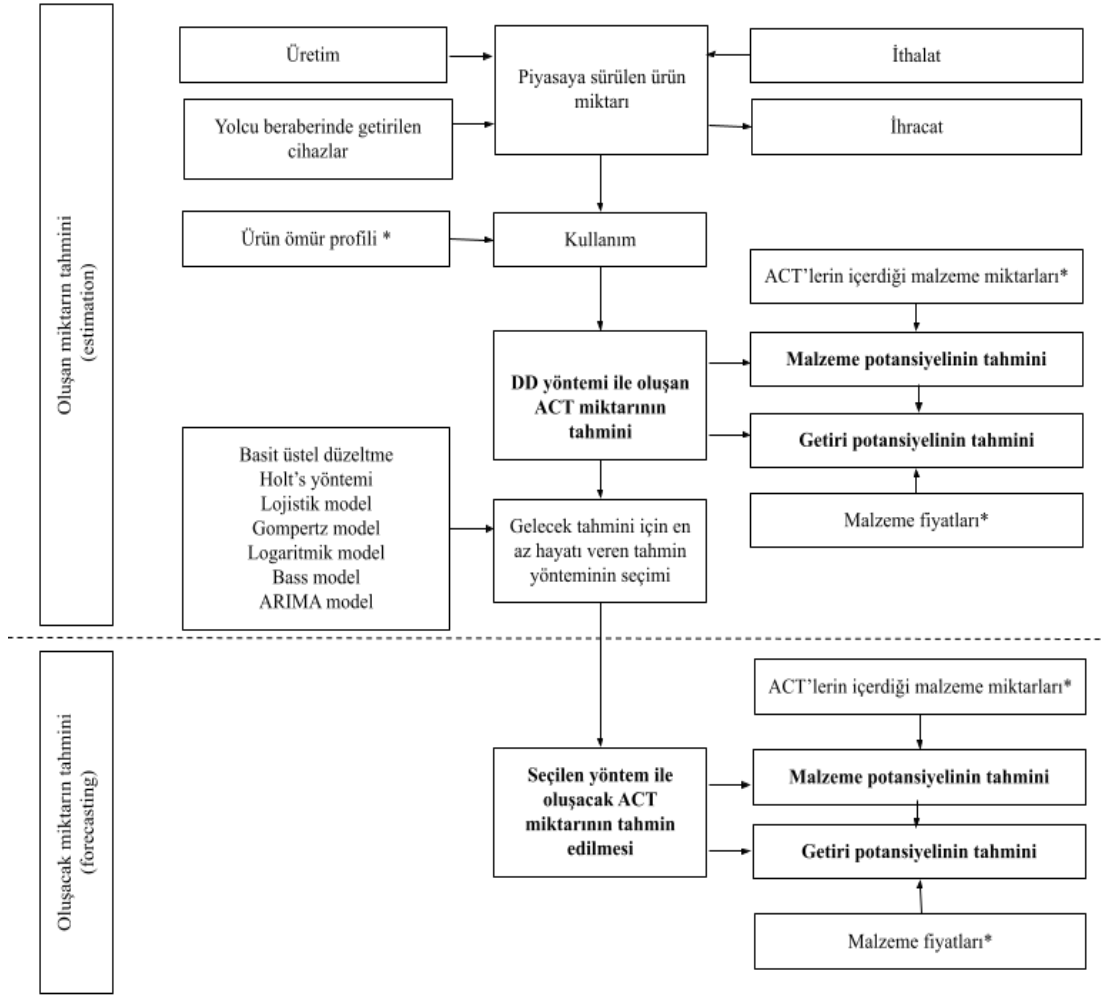
Sonuç olarak, önerilen GCM ile daha hassas ve güvenilir sonuçlar elde etmek mümkündür. E-atık oluşumu, teknolojik gelişmelerin hızıyla doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, önerilen GCM modeli ile ürün ömürlerinin her bir ürün yaşam sonu evresi için farklı olabilmesine imkân tanınarak, gerçek sistem daha iyi modellenebilir hale getirilmiştir. Önerilen yöntem, ürün ömür profiline her bir yıl için tanımlanması ve satış ya da piyasaya sürülen ürün bilgilerinin elde edilmesiyle tüm elektronik ürünler için e-atık oluşumunun tahmininde kullanılabilir.

6. E-ATIK TAHMİNİ İÇİN SİSTEMATİK BİR TAHMİN YAKLAŞIMI VE TÜRKİYE’DE ATIK CEP TELEFONU (ACT) TAHMİNİ UYGULAMASI

Tezin bu bölümünde e-atık tahmini için sistematik bir tahmin yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşım Türkiye ACT örneği üzerinde uygulanmıştır. Şunu belirtmekte fayda vardır ki; önerilen yaklaşımın uygulaması Türkiye’de ACT tahmini için yapılmış olsa da farklı ürün ve ülkeler için uygulanmasında engel yoktur. Modelin asıl amacı daha önce ve bu bölümün izleyen alt bölümlerinde de belirtildiği üzere, hem girdi-çıkıtı analizini kullanıyor olması hem de tahmin yaparken birden fazla zaman serisi tahmin yöntemini dikkate alarak en iyi performans gösteren yöntemi seçiyor olmasıdır.

6.1 Sistem Sınırları

Tezin bu bölümünde önerilen yaklaşımın coğrafi olarak sınırları Türkiye’dir. Elektronik atık tahmini yapılan ürün cep telefonları olup, zaman periyodu 2001-2035 yılları ile sınırlandırılmıştır. 1994-2020 yıllarına ait piyasaya sürülen ürün miktar verileri uygun hesaplamalar yardımıyla satış verisi olarak kullanılmıştır (Tablo A1). 2001-2020 yılları için ürün ömür profiline dayalı olarak yıllık oluşan ACT miktarları DD yöntemi ile tahmin edilmiştir. Farklı tahmin yöntemleri kullanılarak mevcut yıllar için oluşan ACT miktarını seçilen performans göstergelerine göre en iyi modelleyen yöntem gelecek tahmin yöntemi olarak belirlenmiştir. 2021-2035 yılları için ise seçilen tahmin yöntemi ile oluşacak ACT miktarları ve bu miktarlara bağlı potansiyel malzeme miktarları ile ekonomik getirileri tahmin edilmiştir. Burada veri kalitesi endişeleri nedeniyle tahmin süresinin 2020 yılında sona erdiğini belirtmekte fayda vardır. Hesaplama için gerekli tüm veriler (üretim ve yolcu beraberinde getirilen cihazlar) henüz yayınlanmamış olup, COVID-19 pandemisi nedeniyle veri kayıt sistematığına yönelik düzenlemeler değiştirilmiştir (Resmi Gazete 2021). Türkiye’de e-atık oluşumu ve tahmini için önerilen sistematik tahmin yaklaşımının sınırları Şekil 6.1’de yer almaktadır.



Şekil 6.1: Yapılan çalışmanın sistem sınırları

Tezin bu bölümünde ACT miktarının zamana bağlı oluşumu, satış verilerine dayalı dinamik ürün ömrü temelli sistematik bir hibrit tahmin yaklaşımı ile tahmin edilmiştir. Girdi-çıkıta analizine dayalı e-atık tahmin yöntemlerinden biri olan Dağılımlı Gecikme (DD) yöntemi kullanılarak mevcut yıla kadar oluşan ACT miktarı dinamik ürün ömür profili dikkate alınarak tahmin edilmiştir. Devamında, yıllara göre oluşan atık miktarları farklı tahmin modelleri kullanılarak modellenmiş ve sistemi en iyi modelleyen tahmin yöntemi ile gelecek tahmini yapılmıştır. Tahmin çıktılarından elde edilen ACT'lerin içerdikleri malzeme miktarlarına bağlı olarak da potansiyel malzeme miktarları ve ekonomik değerleri elde edilmiştir. Bu malzemeler ve gelir potansiyelleri DE açısından tartışılmıştır. Çalışmada önerilen yaklaşımın algoritması Tablo 6.4'te verildiği gibidir. Tezin bu bölümünde önerilen sistematik e-atık tahmin yaklaşımının genel akışı aşağıda verildiği gibidir:

Tablo 6.4: Önerilen yaklaşımın algoritması

Adım	Açıklama
1	Girdi: Satış verileri, ürün ömür profili
2	t yılındaki e-atık miktarının tahmini /*DD yöntemi ile, $\forall t/$
3	Projeksiyon için uygun tahmin yönteminin seçimi /tahmin periyodu için hatanın en küçüklenmesi amacı altında /
4	Oluşacak e-atık miktarının tahmini / seçilen tahmin yöntemi kullanılarak, $\forall t/$
5	Malzeme potansiyelinin hesaplanması / $\forall t/$
6	Getiri potansiyelinin hesaplanması / $\forall t/$
7	Çıktı: Oluşan ve oluşacak e-atık miktarı /adet, $\forall t/$, E-atıkların malzeme ve getiri potansiyeli /* ton ve ABD doları, $\forall t/$

6.2 E-atık Oluşumunun Tahmini

Bu bölümde e-atık oluşum modelinin matematiksel formülasyonu anlatılmaktadır. Oluşan e-atık miktarını tahmin etmede kullanılan bu model, ürün satışlarının (piyasaya sürülen) tarihsel verilerine ve kullanım ömrü ampirik dağılımına dayanmaktadır. Kullanılan ürün ömrü dağılım fonksiyonu ve parametreler Forti ve diğ. (2018)'da yer alan değerler dikkate alınarak hesaplanmıştır.

ACT miktarları, Dağılımlı Gecikme (Distribution Delay, DD) yöntemine göre tahmin edilmektedir. Bu yöntem, değerlendirme yılındaki görece eskime oranlarını dikkate alır. Belirli bir t yılı için e-atık miktarı, bir ürünün piyasaya girdiği n_0 yılından başlayarak n yılında satılan ürünlerin e-atığa dönüşme (eskime) yüzdelerinin toplamıdır. Yöntem, geçmiş satış veya piyasaya sürülen ürün miktarı (Put on market, POM) verilerine ve ürün ömrü dağılımına ihtiyaç duyar. Bir t yılında üretilen toplam e-atık miktarı, S_n n yılındaki satışı, $f_{n,t}$ ise n yılında satılmış bir ürünün t yılında e-atığa dönüşme olasılığını göstermek üzere, Denklem (6.1)'de verildiği gibi hesaplanır. Bu denklemin çıktısı, farklı yıllarda satılıp t yılında e-atığa dönüşen ürün miktarlarının toplamıdır.

$$O_t = \sum_{n=n_0}^t S_n f_{n,t} \quad (6.1)$$

Forti ve diğ. (2018)'a göre, bir ülkenin POM verisi mevcut değilse, bu veri Denklem (6.2)'de yer alan ithalat (I_t), yerli üretim (DP_t), ve ihracat (E_t) verileri kullanılarak hesaplanabilir.

$$S_t = I_t + DP_t - E_t \quad (6.2)$$

Bu çalışmada cep telefonu özelinde bir hesaplama yapma gerekliliği ortaya çıkmıştır. Her bir yıla ait POM verileri hesaplanırken yolcu beraberinde getirilen cep telefonları da dikkate alınmıştır. Yolcu beraberinde yurtdışından getirilen cep telefonlarının (electronic devices in accompanied baggage) (AB_t) sorunsuz bir şekilde kullanılabilmesi için bu cihazların kayıt altına alınmaları gereklidir. Bu kaydın yolcunun Türkiye'ye giriş tarihinden itibaren 120 gün (2020 yılında Covid-19 nedeniyle 365 güne çıkarılmıştır) içinde Türkiye E-devlet Kapısı sistemi üzerinden yapılması zorunludur. Bu nedenle Denklem (6.2), Denklem (6.3)'te verildiği şekilde güncellenmiştir:

$$S_t = I_t + DP_t - E_t + AB_t \quad (6.3)$$

Türkiye için piyasaya sürülen ürün miktarı hesaplaması yapılırken, veriler farklı kurum ve bakanlıkların kaynaklarından 1994-2020 yılları için derlenmiş ve Tablo 6.1'de bu veri kümesi paylaşılmıştır. Çalışma kapsamında piyasaya sürülen ürün miktarlarının piyasaya girdikleri yıl içinde satıldıkları ve yolcu beraberinde getirilen cihazların yeni satın alındığı varsayılmıştır.

Tablo 6.1: Cep telefonu satış verileri (yıl/adet)

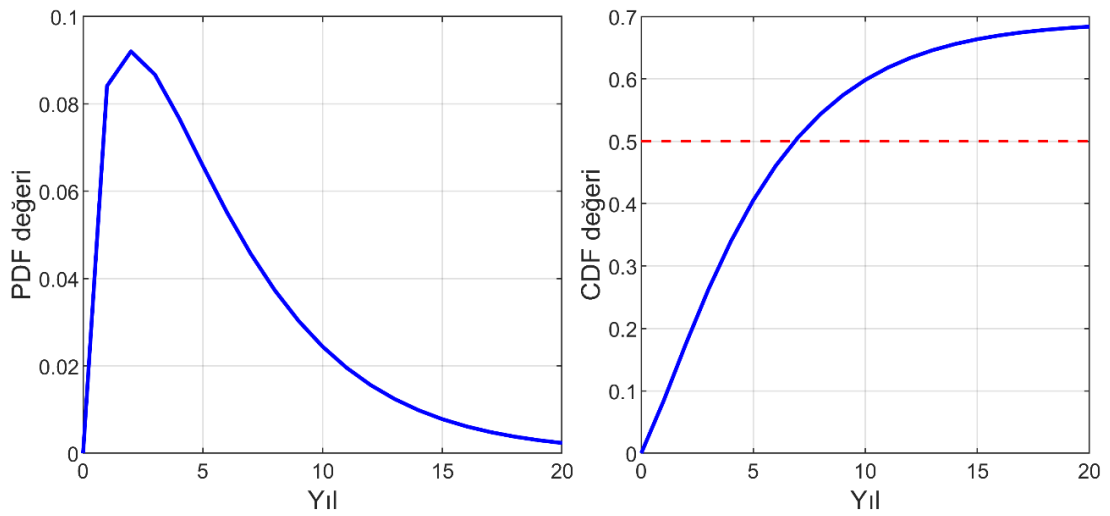
Yıl	Satış	Yıl	Satış
1994	175.000	2008	15.175.361
1995	300.000	2009	11.465.479
1996	425.000	2010	13.242.063
1997	900.000	2011	15.364.646
1998	2.200.000	2012	11.792.381
1999	6.300.000	2013	13.383.213
2000	7.413.478	2014	13.631.883
2001	1.917.456	2015	15.313.032
2002	3.786.595	2016	14.646.049
2003	5.188.665	2017	14.053.849
2004	7.535.185	2018	11.912.161
2005	8.970.955	2019	14.912.261
2006	13.272.166	2020	10.532.165
2007	16.405.664		

DD yönteminin diğer girdisi ürün ömrüdür. Ürün ömrü verileri genel olarak hükümetler tarafından resmi olarak tanımlanmaz, ancak anket, geri dönüşüm merkezi veya literatür gibi kaynaklardan bazı bilgiler elde edilebilir. Literatürde eskime tabanlı ürün yaşam süreleri Normal, Weibull, Cauchy, Lojistik fonksiyon gibi farklı olasılık fonksiyonları kullanılarak modellenmiştir (Yan ve diğerleri, 2013, Petridis ve diğerleri, 2017, Park ve diğerleri, 2011). Çalışmaların çoğunda Weibull dağılım fonksiyonunun, ürünlerin eskime (atığa dönüşme) davranışını tanımlamada en uygun olduğu belirtilmiştir (Steubing ve diğerleri, 2010, Kim ve diğerleri, 2013, Guo ve Yan, 2017, Abbondanza ve Souza, 2019). Cep telefonu ve taşınabilir bilgisayar gibi kararlı ürünlerin ürün ömür dağılımını tanımlamak için kullanılan fonksiyon Denklem (6.4)'te verilmiştir:

$$f_{n,t} = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} (n-t)^{\alpha-1} e^{-[(n-t)/\beta]^\alpha} \quad (6.4)$$

$$E = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (6.5)$$

Burada α ürünün kademeli eskimesini açıklayan şekil parametresi (shape parameter) ve β ürünün karakteristik ömrünü açıklayan ölçek parametresidir (scale parameter). Denklem (6.5)'te E ürün ömrünü tanımlayan ortalama süredir ve Γ gama fonksiyonudur. Türkiye için doğrulanmış herhangi bir ürün ömrü verisi bulunmadığından, bu çalışmada UNU-Key:0306 Cep telefonları için Avrupa Birliği dışındaki ülkeler için tanımlanmış yaklaşık değerli Weibull ömür dağılım parametre değerleri $\alpha=1.52$ ve $\beta=5.62$ (Forti ve diğ. 2018) ve ortalama ürün ömrü (E) 5,06 yıl olarak kullanılmıştır. Bu değerlere ait olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) ve birikimli dağılım fonksiyonu (CDF) grafikleri Şekil 6.2'de yer almaktadır.



Şekil 6.2: PDF ve CDF eğrileri ($\alpha=1.52$ ve $\beta=5.62$)

Şekil 6.2'de CDF eğrisinde gösterilen kırmızı çizgiye (veya kesikli çizgiye) göre, birikimli olarak piyasaya sürülen ürünlerin en az yarısı altı yıldan fazla bir süre içinde e-atık olacaktır. Bu nedenle satış (POM) verileri 1994 yılından itibaren mevcut olsa da sonuçlar 2000 yılı sonrası için raporlanmış ve dikkate alınmıştır.

6.3 E-atık Oluşumunun Gelecek Tahmini

Bu çalışmada tahmin stratejisi, farklı modeller arasından en iyi modelin seçilmesi üzerine yapılandırılmıştır. Zaman serisi analizi, tahmin için en çok kullanılan nicel yöntemdir. Bu çalışmada ACT miktarını tahmin etmek için çeşitli zaman serisi yöntemleri (üstel düzeltme, büyüme ve otoregresif modeller) kullanılmıştır. Denklemler e-atığa dönüşen ürün miktarları için güncellenmiştir.

6.3.1 Üstel Düzeltme Yöntemleri

Üstel düzeltme yöntemleri başlangıçta Pegels (1969) taksonomisine göre sınıflandırılmış, daha sonra Gardner ve Everette (1985) tarafından genişletilmiş ve Hyndman ve diğ. (2002), Taylor ve Hyndman (Hyndman ve Khandakar 2008; Taylor 2003) tarafından güncellenmiştir. Literatürde farklı e-atık türlerini tahmin etmek için üstel düzeltme yöntemleri kullanılmıştır (Islam ve Huda 2019; Koshta ve diğ. 2021; Petridis ve diğ. 2016). Bu çalışmada, ACT miktarını tahmin etmek için Basit Üstel Düzeltme (Simple Exponential Smoothing, SES) yöntemi ve Holt's Doğrusal Yöntemi kullanılmıştır.

SES, iyi bilinen tahmin yöntemlerinden biridir ve özellikle durağan zaman serileri için yüksek tahmin kabiliyetine sahiptir. SES, üstel olarak azalan ağırlıklarla ağırlıklı bir hareketli ortalama kullanır (Yasar ve Kilimci 2020). Bu yöntem seviye/düzeltilme ve tahmin için sırasıyla Denklem (6.6) ve (6.7)'de verilen iki basit denklemi kullanır:

$$l_t = \alpha O_t + (1 - \alpha)(l_{t-1}) \quad (6.6)$$

$$\hat{O}_{t+h|t} = l_t \quad (6.7)$$

Burada O_t , t zamanında zaman serisinin gözlenen değeridir. l_t düzeltilmiş seviyeyi temsil eder. α düzeltme faktörü, h tahmin adımı ve $\hat{O}_{t+h|t}$ dönem $(t + h)$ için tahmin edilen değerdir.

Holt's Doğrusal Yöntemi, bir trend bileşeninin varlığı söz konusu olduğundan SES yönteminin genişletilmiş bir versiyonudur. Diğer bir deyişle, bu yöntem zaman serilerinin hem trendini hem de dalgalanmasını hesaba katar. Bu nedenle, bu yöntem sırasıyla Denklemler (6.8), (6.9) ve (6.10)'da verildiği gibi seviye, eğilim ve tahmin denklemlerini kullanır:

$$l_t = \alpha O_t + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1}) \quad (6.8)$$

$$b_t = \beta^*(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1} \quad (6.9)$$

$$\hat{O}_{t+h|t} = l_t + b_t h \quad (6.10)$$

Burada β^* trend düzeltme faktörü ve b_t büyümeyi temsil etmektedir. Diğer değişkenler ise SES'te tanımlandığı gibidir. O_1, O_2, \dots, O_n olarak verilen ifadenin her

bir yıl için gerçekleşmiş (observed data) ACT miktarını ifade eden zaman serisi verileri olduğuna dikkat edilmelidir. Ayrıca bir \hat{O}_{t+h} değeri, $\hat{O}_{t+h|t}$ ile gösterilen ve t zamanına kadarki tüm verilere dayanan tahmini ifade etmektedir.

6.3.2 Büyüme Modelleri

Trend modelleri olarak bilinen büyüme modelleri, teknolojik yayılma ve e-atık tahmini için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yukarıda belirtilen üstel düzeltme yöntemlerinin yanı sıra, ACT miktarını tahmin etmek için Lojistik, Gompertz ve Logaritmik modelleri içeren üç doğrusal olmayan büyüme modeli kullanılmıştır.

Lojistik büyüme modeli, yaygın olarak kullanılan büyüme eğrisi modellerinden biridir. Bu model, S şeklindeki zaman serileri için sönümlü trend bilgisi elde etmeye çalışır. Genel olarak, bu model bir popülasyonu modellemek için üstel bir fonksiyon kullanır. Belirli bir değere yaklaştığında, büyüme gerçekçi bir şekilde sönümlenir. Bu model, kısıtlı büyümeye sahip zaman serileri için uygun bir tahmin aracıdır. Lojistik büyüme modeli Denklem (6.11)'de verilmiştir:

$$\hat{O}_t = \frac{a}{1 + be^{-kt}}, k > 0 \quad (6.11)$$

Burada da \hat{O}_t t yılındaki e-atık miktarını göstermektedir. a taşıma kapasitesi (ACT), k popülasyonun (ACT) büyüme hızını, b ise taşıma kapasitesi ile başlangıç ACT miktarı arasındaki farktır.

Gompertz modeli, biyoloji, tıp bilimi, mühendislik ve ekonomi gibi çok çeşitli disiplinlerde büyüme eğrilerini tanımlamak için kullanılan bir başka lojistik büyüme modelidir. Bu model lojistik modelden asimetric olması yönüyle farklılık göstermektedir. Gompertz modeli, asimptotik ve S-şekilli veri serilerini bir sigmoid eğriyle yakından eşleştirmeye çalışır. Bu model, Denklem (6.12)'deki gibi ifade edilmektedir:

$$\hat{O}_t = me^{-ae^{-bt}} \quad (6.12)$$

Burada yine \hat{O}_t t yılındaki e-atık miktarını göstermektedir. m bir asimptot, a ve b difüzyonun meydana geldiği yer ve zaman ile ilgili negatif olmayan katsayılarıdır.

Logaritmik büyüme modeli ise, başlangıçta çok hızlı büyüme gösteren, ardından daha yavaş büyüme gösteren tek değişkenli zaman serilerini modellemek ve tahmin etmek için kullanılır. ACT miktarını tahmin etmek için kullanılan bu büyüme modeli Denklem (6.13)'te verilmiştir:

$$\hat{O}_t = a + b \ln t \quad (6.13)$$

Burada \hat{O}_t t yılındaki e-atık miktarı olmak üzere, a ve b büyüme hızını kontrol etmektedir.

6.3.3 Otoregresif Modeller

Otoregresif modeller, doğada zamanla değişen belirli süreçleri tanımlayabilmeleri nedeniyle zaman serilerini modellemek için sıklıkla kullanılır. Bu tür modellerde, gelecekteki çıktı önceki çıktılara bağlıdır. Bu çalışmada, ACT tahmini için Bass ve Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) modelleri kullanılmıştır.

Bass model (Bass 1969) genel olarak, önceki satın alma miktarlarının, bir tüketicinin ilk satın alma işlemini yaparken etkilediğini iddia eder. Modelin davranışsal açıklaması, yenilikçi ve taklit davranışı açısından sunulmaktadır. Bass modeli, bu varsayımın ACT oluşumunda da geçerli olup olmadığını araştırmak için kullanılmıştır. Bass modeli Denklem (6.14) ve (6.15)'te verildiği şekilde ifade edilmektedir:

$$\hat{O}_t = \left(p + q \frac{Y_t}{m}\right)(m - Y_t) \quad (6.14)$$

$$Y_t = \sum_{n=1}^{t-1} \hat{O}_n \quad (6.15)$$

Burada \hat{O}_t artımlı ACT miktarını, Y_t ise kümülatif olarak oluşmuş olan ACT miktarını göstermektedir. p ve q yenilikçilik ve taklitçilik katsayılarını ifade etmekte olup, m maksimum doyum oranını göstermektedir.

Box ve Jenkins modelleri olarak bilinen ARIMA modelleri, otoregresif ve hareketli ortalama modellerinin bir kombinasyonudur (Chatfield 2000). Mevsimsel olmayan ARIMA modelleri, $ARIMA(p, d, q)$ ile gösterilir. p otoregresif modelin derecesini, q hareketli ortalama modelinin derecesini ve d ise fark alma derecesini göstermektedir. Bütünleşik bir sıfıncı dereceden $ARMA(p, q)$ modeli Denklem (6.16)'da verildiği gibi ifade edilmektedir:

$$\hat{O}_t = c + \sum_{i=1}^p \Phi_i \hat{O}_{t-i} + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (6.16)$$

Burada Φ ve θ sırasıyla $AR(p)$ ve $MA(q)$ modellerinin katsayıları, ; ε_t ise hata terimidir.

6.4 Tahminleri Değerlendirme ve Yöntem Seçimi

Tahminlerin ne kadar doğru olduğunu değerlendirmek için standart bir yöntem yoktur. Bu nedenle, uzmanlar genellikle hangi ölçünün kullanılması gerektiği konusunda farklı görüşlere sahiptir (Christodoulos ve diğ. 2010). Kullanılan modellerin doğruluğunu değerlendirmek için genel olarak üç ölçüm kullanılır: Ortalama Mutlak Hata Yüzdesi ($MAPE$), Ortalama Hata Karekökü ($RMSE$) ve Hata Kareleri Toplamı (SSE). $MAPE$ doğruluğu Denklem (6.17)'de verildiği gibi yüzde olarak ölçer:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{O_t - \hat{O}_t}{O_t} \right| \times 100 \quad (6.17)$$

Burada \hat{O}_t ve O_t sırasıyla model tarafından tahmin edilen değer ve tahmin döneminde DD yöntemi tarafından gözlemlenen değerdir.

RMSE (Denklem (6.18)) tahmin hatalarının standart sapmasını ölçerken, *SSE* (Denklem (6.19)) gözlemlenen ve modellenen veriler arasındaki farkların karelerinin toplamını ölçer. *SSE*, artık kareler toplamı olarak da bilinir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (O_t - \hat{O}_t)^2} \quad (6.18)$$

$$SSE = \sum_{t=1}^n (O_t - \hat{O}_t)^2 \quad (6.19)$$

Bu sürece ilişkin adımlar Tablo 6.2’de gösterilmiştir:

Tablo 6.2: Tahmin değerlendirme algoritması ve projeksiyon için yöntem seçimi

Adım	Açıklama
1	Girdi: Tahmin edilen e-atık miktarı (DD yöntemi ile elde edilen sonuçlar /adet, $\forall t$)
2	Tahmin edilen e-atık miktarının <i>SSE</i> ’nin en küçüklenmesi amacı altında modellenmesi / SES, Holt’s, Lojistik, Gompertz, Logaritmik, Bass, ARIMA kullanarak, $\forall t$
3	<i>SSE</i> , <i>MAPE</i> ve <i>RMSE</i> değerlerinin hesaplanması
4	En küçük hatayı veren yöntemin seçilmesi
5	Çıktı: Gelecek projeksiyonu için seçilen tahmin yöntemi

6.5 Malzeme Analizi

Stahel (2016) dögüsel ekonomiyi (DE) şöyle ifade etmiştir: " DE Üretimi yetinmeyle değiştirir: kullanabildiğin kadar yeniden kullan, yeniden kullanılamayanı geri dönüştür, bozulanı tamir et, tamir edilemeyecek olanı yeniden üret." E-atık dünya çapında en hızlı büyüyen atık kategorisi olduğundan (Baldé ve diğ. 2017), DE’ye önemli ölçüde katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. DE, e-atıklara çöpe gitmeden önce ikinci bir şans verir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında yapılan çalışmalar tahmin aşamasında bırakılmamış DE perspektifinden de incelenmiş ve tartışılmıştır.

Küresel E-atık İzleme Raporu'na göre (Baldé ve diğ. 2017), ortalama ağırlığı 90 g olan bir cep telefonu, 2 euro değerinde değerli metaller ve polimerler içerir. Bu nedenle, sıfır veya ikinci el cep telefonlarının satış fiyatına kıyasla içerdikleri hammaddelerin değeri düşüktür. 2016 yılında dünya çapında toplam 435 bin ton ACT oluşmuştur. Bu miktar 9,4 milyar euroluk bir hammadde değerine tekabül etmektedir (Baldé ve diğ. 2017). Tüm telefonların daha uzun ömürlü olması ve ikinci el pazarına girebilmesi durumunda potansiyel değer kayda değer şekilde daha da büyük olabilir (Baldé ve diğ. 2017).

Bu çalışma, ACT'lerin içerdikleri malzeme miktarlarını göz önünde bulundurarak, bu malzemelerin geri kazanımının yaratacağı malzeme miktarı ve potansiyel ekonomik getiriyi hesaplayarak e-atık tahmin sürecine ek bir katkı sağlamaktadır. Malzeme analizinin girdileri, ACT tahmin sonuçlarıdır. Tablo 6.3'te malzeme analizinin algoritması yer almaktadır:

Tablo 6.3: Malzeme analizi algoritması

Adım	Açıklama
1	Girdi: E-atık miktarları, birim üründe bulunan malzeme miktarları, her bir malzemenin birim fiyatı / \forall t/
2	Her bir malzeme için toplam atık malzeme miktarının hesaplanması / \forall t/
3	Birim ürün için her bir malzemenin getirisinin hesaplanması / \forall t/
4	Her bir malzemenin tüm e-atıklar için toplam getirisinin hesaplanması / \forall t/
5	Çıktı: Toplam getirinin ve malzeme miktarının hesaplanması / \forall t/

Literatürde cep telefonu malzeme analizini içeren çeşitli çalışmalar olup, bu çalışmaların sayısı cep telefonu imalatında kullanılan kıymetli madenlerin dünyada kıt bulunması ve zararlı metallerin çevre ve insan sağlığına yıkıcı etkilerinin bulunması nedeniyle her geçen gün artmaktadır. Cucchiella ve diğ. (2015) 14 farklı teknolojik ürün için malzeme getiri analizi yaparak farklı senaryolar için bu getirinin değişimini incelemişlerdir. Gupta ve diğ. (2020)'un çalışması ise hücreli ve akıllı telefonların içerdikleri element miktarlarını analiz etmektedir. Türkiye için atık cep telefonlarının potansiyel ekonomik getirisi ile ilgili tek çalışma ise Sahan ve diğ. (2019)'nindir. Çalışmada 10 çeşit cep telefonunun malzeme analizi yapılmış sonrasında ise Öztürk

(2014)'ün çalışmasında 2012 yılı için tahmin ettiği atık cep telefonu miktarı temel alınarak toplam potansiyel ekonomik getiri değerleri hesaplanmıştır.

2015 yılında ortalama 1.160, 2019 yılında ortalama 1.392 ABD doları olan altının ons fiyatı, 2020 yılında 1.769 dolar ortalama değere ulaşmıştır. Covid-19 küresel pandemisi, döngüsel ekonomi odaklı üretim ve hizmet süreçlerinin yaygınlaşması, iklim ve enerji krizi, siyasi yaklaşımlar gibi çok farklı nedenlerle piyasaların belirsizliği ve dengesizliği artmaktadır. Bunun bir sonucu olarak da malzemelerin fiyatları da hızlı bir değişim göstermektedir. Tablo 6.4'te Nisan 2022 tarihi itibarıyla birim cep telefonunda getirisi en yüksek 10 malzemenin cep telefonunda bulunma miktarları ve piyasa fiyatlarına dayalı olarak bir cep telefonu için her bir malzemenin potansiyel getirisi hesaplanmıştır.

Tablo 6.4: Cep telefonlarının içerdiği malzeme yoğunlukları ve ekonomik değerleri

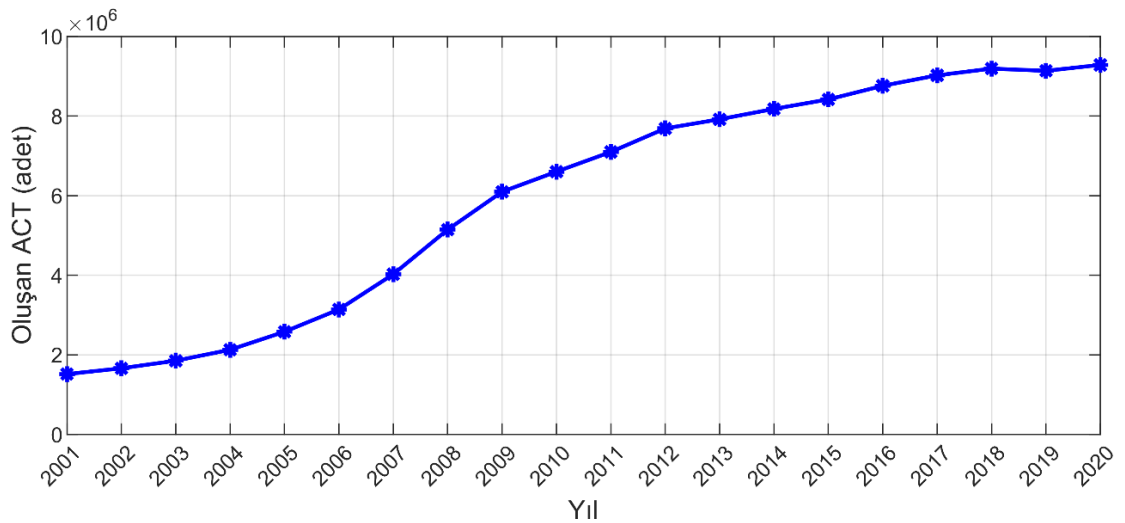
Malzeme	Miktar (gram/adet) (Cucchiella ve diğ. 2015)	Fiyat (US\$/Ton) (Price 2022)	Getiri (US\$/adet)
Altın	0,038	62.160.000	2,36208
Paladyum	0,015	73.190.000	1,09785
Kobalt	6,3	82.000	0,5166
Gümüş	0,24	793.801,93	0,19051246
Bakır	14	10.323,15	0,1445241
Platin	0,004	31.680.000	0,12672
Nikel	1,5	33.217	0,0498255
Alüminyum	2,9	3.450	0,010005
Çinko	1	4.339	0,004339
Kurşun	0,6	2.450,09	0,00147005

Altın bu 10 elementin toplam kütesinin %0,14 ünü oluşturmasına rağmen, toplam ekonomik getirinin %52,5'i gibi bir oranla yarısını tek başına sağlamaktadır. Bakır ise kütenin %52 sini oluştururken getiri olarak katkısı tüm malzemelerin içinde %3,2'dir. Bu metallerin birim cep telefonu başına toplam getiri potansiyeli ise yaklaşık 4,5 ABD dolarıdır.

6.6 Hesaplamalı Sonuçlar ve Tartışmalar

6.6.1 Oluşan E-atık Miktarının Tahmini

Denklem (6.1)'deki ifadede daha önce Tablo 6.1'de verilen satış miktarları ve ürün ömür dağılımı kullanılarak, 2001–2020 dönemi için DD yöntemiyle tahmin edilen ACT miktarları Şekil 6.3'te verilmiştir. DD yöntemi Excel VBA'da kodlanarak sonuçlar elde edilmiştir. 2001'de 18,3 milyon, 3G'ye geçiş yılı olan 2009'da 62,8 milyon ve 2020'de 82,1 milyon mobil abone varken, oluşan ACT miktarı 2001'de yaklaşık 1,5 milyon adetken, 2020'de 9 milyonu aşmıştır. 2020 yılında cep telefonu abone sayısı 2009 yılına göre %30 artarken, oluşan ACT miktarı bir buçuk kat artmıştır. Ayrıca çift simli cep telefonlarından dolayı cep telefonu abone sayısının cihaz sayısından çok daha fazla olduğu hesaba katıldığında bu oran %50'nin çok üzerindedir. Türkiye'de az miktarda e-atığın geri kazanım ve geri dönüşüm sürecine girdiği bilinmektedir. Sadece ACT'ler düşünüldüğünde dahi Türkiye'de milyonlarca ACT'nin döngüsel ekonomiye kazandırılmayı beklediği ortaya çıkmaktadır. Müşteriler, fiziksel boyutlarına rağmen bilgi teknolojilerine dayalı ürünler için yüksek fiyatlar ödemektedirler. Bu nedenle müşteriler, ACT'leri geri kazanım ve geri dönüşüm sistemlerine teslim etmeye pek de istekli değildir. Bununla birlikte, bazı teşvikler ve uygulamalar uygulandığı takdirde, ACT'lerin sahip olduğu potansiyel bir maden yatağının keşfine eşdeğer düzeyde kıymetlidir.



Şekil 6.3: DD yöntemi kullanılarak 2001–2020 için tahmin edilen ACT miktarları

6.6.2 Yöntem Seçimi ve Gelecek Tahmini

Daha önce bahsedilen yedi tahmin modeli, Basit Üstel Düzeltme, Holt's, Lojistik, Gompertz, Logaritmik, Bass ve ARIMA modelleri, 2001–2020 yıllarında üretilen ACT miktarlarını (Bölüm 6.6.1'in çıktıkları) modellemek için kullanılmıştır. Modelleme sürecinde, SSE kriterlerine göre model parametre sınırları dikkate alınarak veriler her bir model için eğrilere uydurulmuştur. Başka bir deyişle, yedi modelin parametre değerleri SSE' ye göre optimize edilmiştir. Hesaplamalar, Intel(R) Core (TM) i7-8700 CPU 3.20 GHz işlemci, 16 GB RAM ve 64 bit Windows 10 işletim sistemine sahip bir bilgisayarda MATLAB (R2018a) platformunda gerçekleştirilmiştir.

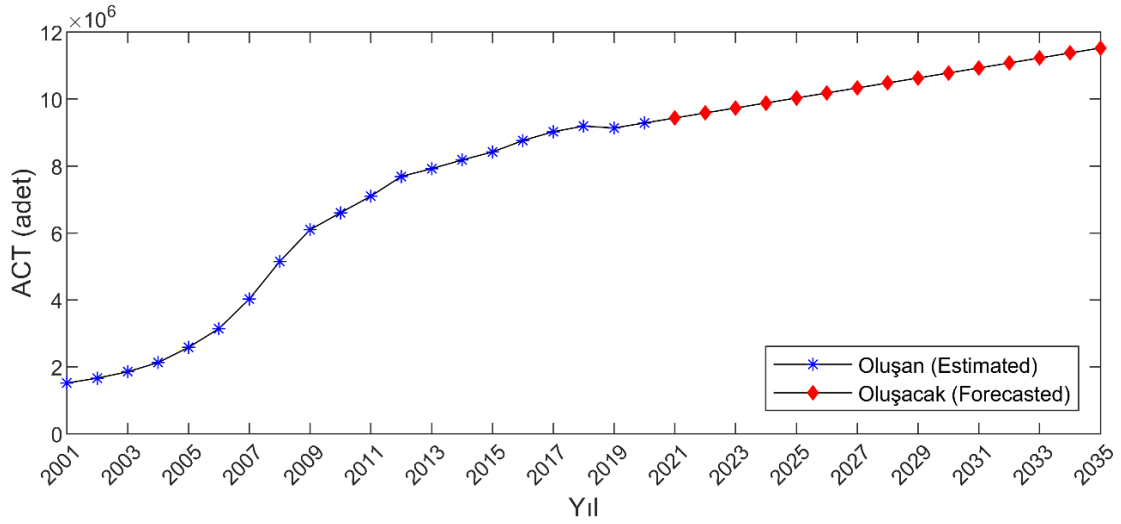
Tahminin doğruluğunu arttırmak için en iyi performans gösteren yöntem tahmin yöntemi olarak seçilmiştir. 2001–2020 yılları için yedi yöntemin MAPE, RMSE ve SSE değerleri Tablo 6.5'te listelenmiştir. Bu tablodaki değerlere göre, Holt's yöntemi tüm hata göstergelerinde en iyi sonuçları verirken, bunu Lojistik, Gompertz ve Bass ve diğer modeller takip etmektedir. Bu nedenle gelecek tahmininde kullanmak için seçilen yöntem olarak Holt's yöntemidir.

Tablo 6.5: Yöntemlere ait modelleme hata değerleri

Yöntem/Hata	MAPE (%)	RMSE ($\times 10^6$)	SSE ($\times 10^{12}$)
SES	8.4444	0.4932	4.8647
Holt's Yöntemi	2.6570	0.1869	0.6987
Lojistik	5.6426	0.2159	0.9320
Gompertz	8.2305	0.3141	1.9727
Logaritmik	26.5907	1.0066	20.2645
Bass	8.4823	0.4436	3.9352
ARIMA	12.2942	0.5157	5.3196

2001–2020 dönemi için DD tarafından elde edilen ACT miktarları, Holt's yönteminin girdileri olarak kullanılmıştır. Daha sonra 2035 yılına kadar Holt's yöntemi ile tahmin gerçekleştirilmiştir. 2001–2035 yılları için tahmin edilen ACT miktarları Şekil 6.4'te gösterilmektedir. ACT miktarı sonraki yıllarda artma

eğilimindedir. Ayrıca üretilen ACT miktarının 2025 yılında 10 milyonu aşacağı ve 2035 yılında 12 milyona yaklaşacağı öngörülmektedir.

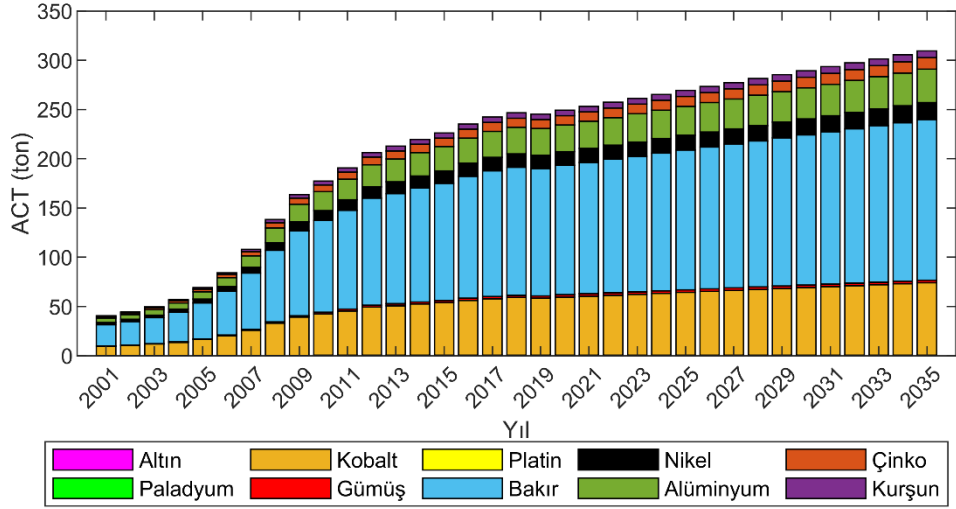


Şekil 6.4: DD ve Holt's yöntemleri kullanılarak tahmin edilen ACT miktarları

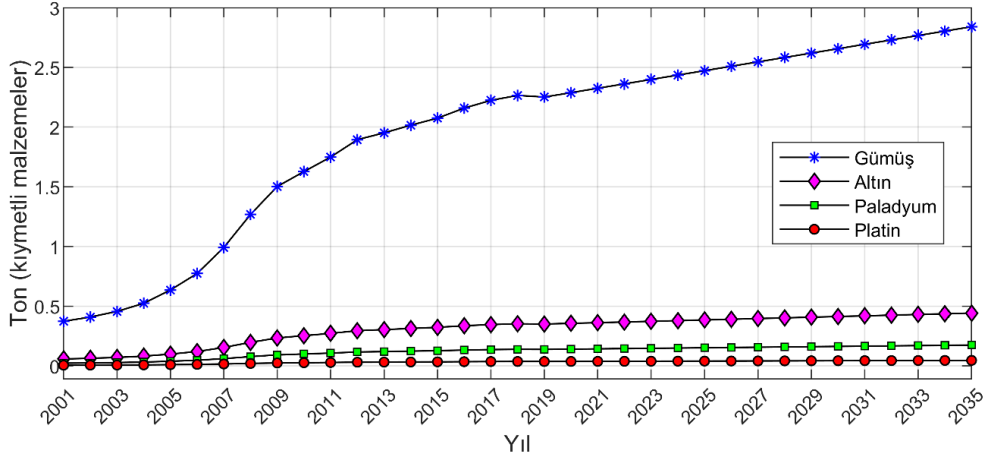
Her bölgenin veri yapısı ve özellikleri birbirinden farklıdır. Bu nedenle kırsal-kentsel nüfus, GSYİH, eğitim düzeyi, bölge, ürün, ürün ömrü gibi birçok faktör ve tüm bu faktörler arasındaki etkileşimler oluşan e-atık miktarını etkilemektedir. Holt's yöntemi, bu çalışmada incelenen sistemi, dikkate alınan sınırlar dahilinde mevcut koşullar altında daha iyi modellemiştir. Ancak bu çalışma, alternatif tahmin yöntemlerini değerlendirdiği için farklı durumlar için esneklik sağlamaktadır. Farklı ürünler veya ülkeler için başka yöntemlerin de daha etkili sonuçlar üretebileceği unutulmamalıdır.

6.6.3 Malzeme Analizi Sonuçları

Bu alt bölümde, ACT'lerde bulunan değerli metaller (altın, gümüş, platin ve paladyum) ve diğer altı malzemenin toplam miktarı ve potansiyel ekonomik değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.5'te 2001–2035 dönemi için tahmin edilen atık malzeme miktarlarının toplam değerlerini göstermektedir. Bu sonuçlardan, toplam atık malzeme miktarının günümüzde 250 tonu aştığı ve 2035 yılında yaklaşık 320 tona ulaşacağı görülmektedir. Ayrıca Şekil 6.6'da 2022 yılında ACT'lerden 372 kg altının geri kazanılabileceğini görülmektedir.

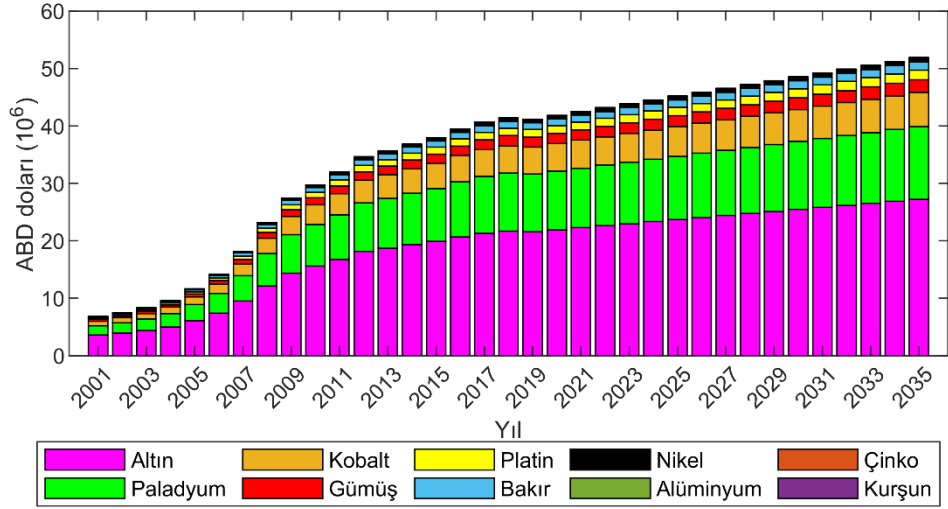


Şekil 6.5: Ton cinsinden atık malzeme miktarları



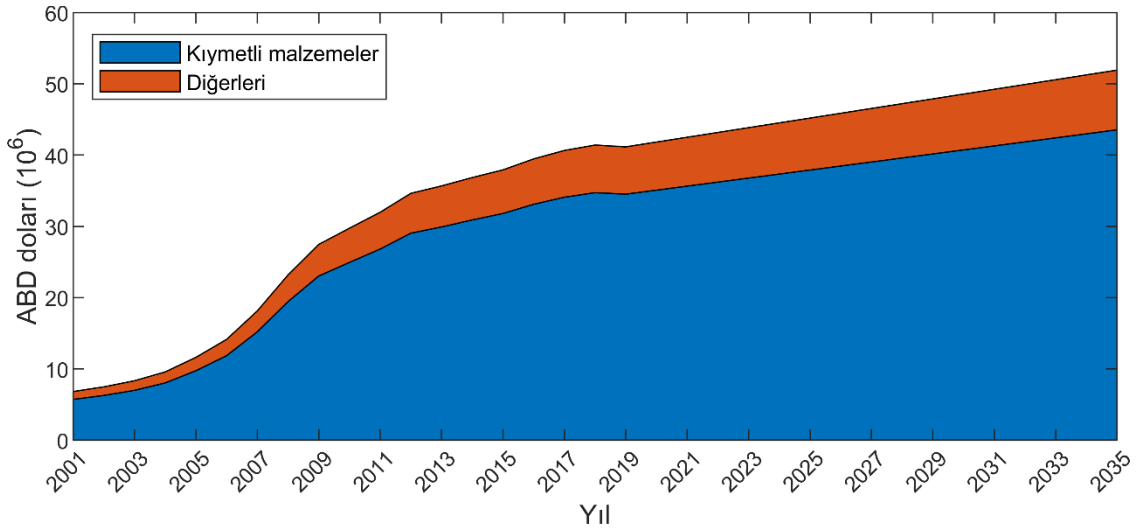
Şekil 6.6: Ton cinsinden kıymetli malzeme miktarları

Getiri potansiyeli, oluşan ACT'lerin miktarına bağlıdır. Şekil 6.7, 2001-2035 yılları arasındaki atık malzemelerin getiri potansiyellerini göstermektedir. Bu değerlerden de görüldüğü gibi, 2022 yılında potansiyel ekonomik değer 45 milyon ABD dolarıdır. Bu getiri potansiyellerinin her bir yıl için milyonlarda dolar değerinde olduğu ve artacağını açık bir şekilde söylemek mümkündür.

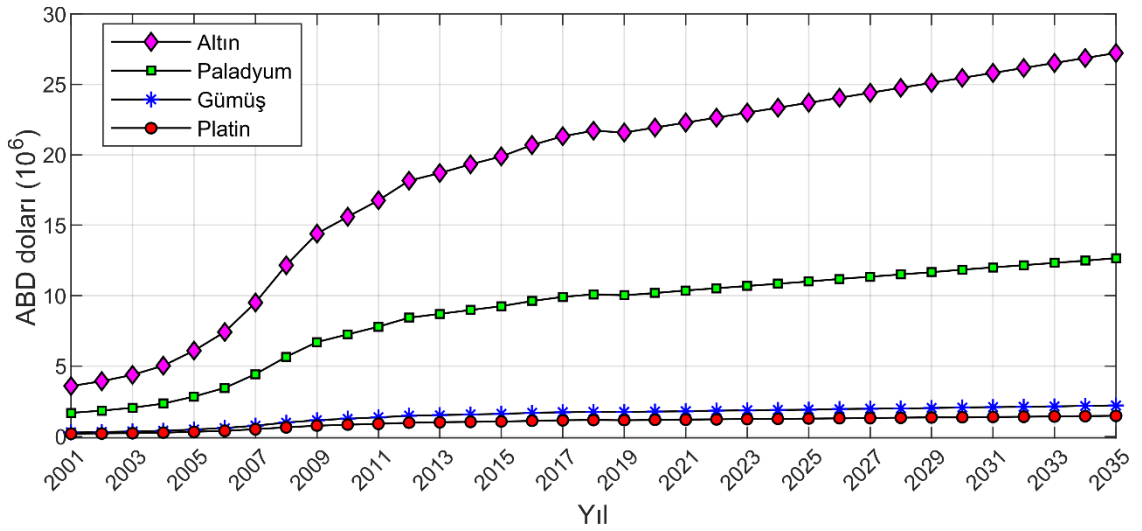


Şekil 6.7: Atık malzemelerin getiri potansiyelleri

Değerli malzemeler, Şekil 6.8(a)'da görüldüğü gibi, potansiyel gelirin en dikkat çekici bölümünü oluşturmaktadır. Ayrıca Şekil 6.8(b)'de ise altının ve paladyumun önemli bir ekonomik potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Ancak ekonomik potansiyeli diğerlerine göre daha düşük olan bir malzemenin, temin edilemediği durumlarda en değerli malzeme haline gelebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. “Damlaya damlaya göl olur” atasözüne de dayanarak, ACT'ler, tüm malzemelerin mümkün olan en yüksek oranda geri kazanımıyla döngüsel ekonomiye önemli ölçüde fayda sağlayabilir.



(a)



(b)

Şekil 6.8: (a) Kıymetli ve diğer malzemeler için toplam getiri potansiyeli; (b) değerli malzemeler için getiri potansiyeli

6.6.4 Duyarlılık Analizi

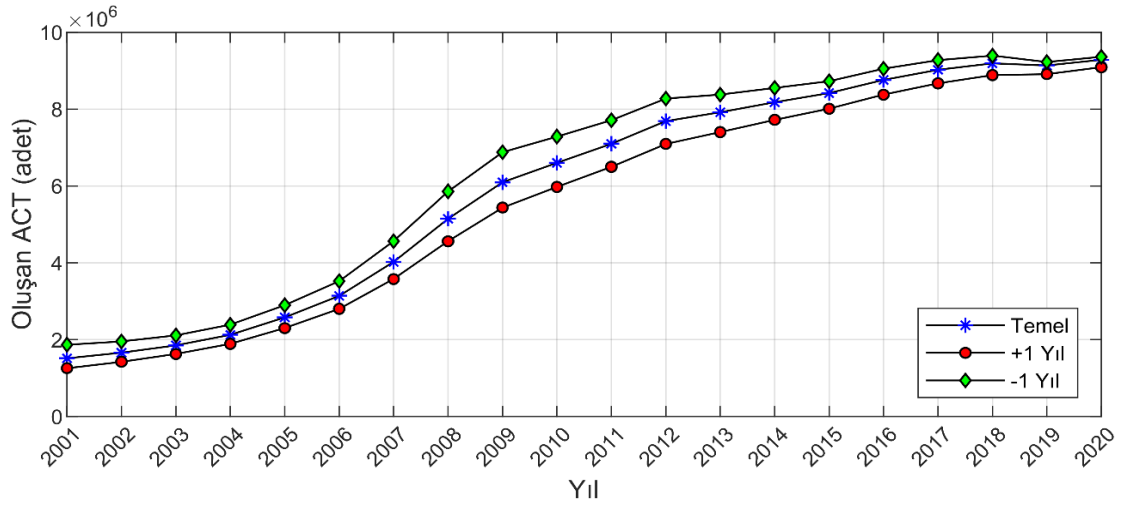
E-atık oluşumu, tahmini ve e-atık yönetimi birçok belirsizlik ve varsayım barındırdığı için, oluşan e-atık miktarı ile ilgili kesin bir değer vermek çok zordur. Bu nedenle e-atık tahmininde herhangi bir hesaplama veya modelleme yapılırken belirsizliğin olması kaçınılmazdır. Elde edilen verilerin sapma göstermesi ya da herhangi bir faktörün dikkate alınmaması, alınan faktörlerin ve aralarındaki ilişkilerin

yeterince tanımlanamaması gibi nedenlerle belirsizlikler katlanarak artmaktadır (Magalini ve diğ. 2014). Ayrıca birçok modelin sistemi modelleyebilme başarısı parametre ve başlangıç koşullarının değerlerine bağlı olduğu Petridis ve diğ. (2016) ve girdi-çıkıtı analizine dayalı e-atık tahmin yöntemlerinde ürün ömürleri varsayımlara veya toplumun / ürünlerin belli bir kesiminden elde edilen bulgulara dayalı olduğu, toplumun atıkları oluşturma oluşan atığı dönüşüm sistemine dahil etme gibi davranışları da bir çok etkene bağlı olduğu için kesin bir tahmin yapmak güçtür. Ancak belirli sınırlar dahilinde dikkate alınan yöntemin kararlılığını artırmak üzere genel yaklaşımlar yapılması da şarttır.

Bu çalışma kapsamında çalışmaya konu olan çıktıları etkileyen üç ana değişken için duyarlılık analizleri yapılmıştır. Bunlar: (1) ürün ömrü, (2) birim cep telefonundaki malzeme miktarı ve (3) malzeme fiyatıdır. Teknolojik değişimin, yeniliklerin ve yüksek kabiliyetli yeni ürünlerin piyasa girme hızı artmaktadır. Diğer açıdan bakıldığında ise sürdürülebilirlik kavramının hayatımıza girmesi, dünya ekonomisinde ortaya çıkan sıkıntılar, enflasyon ve yüksek enflasyon beklentileri, alım gücünün düşmesi ya da düşme tehdidi nedeniyle tüketicilerin tüketim çılgınlığı davranışlarını terk etme meyilleri, ACT oluşumunu etkileyebilecek güce sahip belirsizlikler arasındadır. Bu nedenlerle ACT'ler ve diğer çıktılar için ürün ömrü dağılımı ± 1 yıl olarak kullanılmıştır. Temel senaryoda kullanılan Weibull dağılımına göre ortalama ürün ömrü 5,04 yıldır ve malzeme miktarları ve fiyatları Tablo 6.4'te verilmiştir. Ayrıca, malzeme miktarları ve fiyatlarının üretilen atık malzeme miktarı ve geliri üzerindeki etkisi de mevcut değerleri %1 değiştirilerek analiz edilmiştir.

Ürün ömrünün değişiminin oluşan ACT miktarına ve dolaylı olarak oluşan toplam atık malzeme miktarı ve getirisine etkisi vardır. Çalışma kapsamında Denklem (6.5)'e göre hesaplanan ve 5,06 yıl olan beklenen ürün ömrü, α parametresi sabit kalmak üzere $\beta=4,50$ ve $\beta= 6,72$ olarak dikkate alınarak 4,06 ve 6,06'ya çekilmiştir. Bu parametre değerlerine bağlı olarak yeniden hesaplanan PDF fonksiyonları ve bu fonksiyon değerlerine bağlı DD yönteminin satış veri setine tekrar uygulanmasıyla 2001-2020 yıllarında oluşan ACT miktarları Şekil 6.9'da verilmiştir. Oluşan ACT miktarlarının birbirine en uzak olduğu nokta 2010 yılı iken 2020 yılında yaklaşık sonuçların elde edildiği söylenebilir. Bu yakınlaşmanın cep telefonu satışlarının son

yıllarda durağanlaşması ve CDF dan gelen eskime oranının %50'ye son 6-7 yıllık zaman diliminde ulaşmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.9:Farklı ürün ömürleri için 2001-2020 yıllarında oluşan ACT miktarları

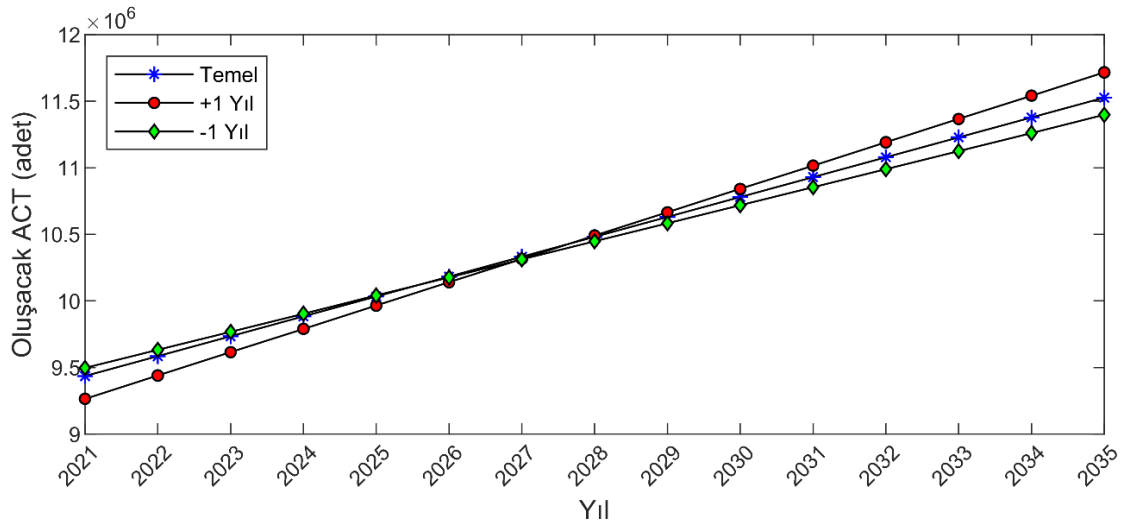
Ürün ömründe meydana gelebilecek 1 yıllık değişimin 2020 yılına olan kümülatif etkisi daha detaylı olarak incelenecek olursa; 1 yıllık artışın oluşan ACT miktarına % 2,12 azalış, kullanım ömründeki 1 yıllık azalışın ise ACT miktarında % 0,8'lik bir artışa yol açtığı ortaya çıkmıştır (Tablo 6.6). Ürünleri bir yıl daha fazla kullanmak 2020 yılı için 200 bin adet daha az ACT oluşacağı, beş tondan fazla atık malzemenin oluşmayacağı/ tedariğine ihtiyaç duyulmayacağı/kullanılmayacağı ve yaklaşık 0,75 milyon dolarlık bir malzemedan tasarruf sağlanacağı anlamına gelmektedir.

Tablo 6.6: Ürün ömründeki değişimlerin çıktılara etkisi

Çıktılar/Ürün ömürleri	Temel	+1 Yıl	-1 Yıl
Oluşan ACT miktarı ($\times 10^6$)	9,286	9,089	9,3614
Atık Malzeme (Ton)	247,020	241,79	249,020
Atık Kıymetli Malzeme (Ton)	2,795	2,736	2,818
Malzeme Getirisi (US\$ $\times 10^6$)	41,824	40,938	42,163
Kıymetli Malzeme Getirisi (US\$ $\times 10^6$)	35,075	34,332	35,360

Ürün ömründeki değişimin gelecek yıllarda oluşacak olan ACT miktarına etkisi de ayrıca incelenmiştir. Temel senaryo için en az hatayı vererek gelecek tahmin yöntemi olarak belirlenen Holt's yöntemi, diğer senaryolar için de doğrudan

kullanılmamıştır. Bunun yerine, Şekil 6.9’da yer alan ve 2001-2020 yıllarında oluşan ACT miktarları yeniden Bölüm 6.3’te yer alan yedi tahmin modeliyle hatanın en küçüklenmesi amacı altında modellenmiştir. Detayları Tablo A.2 ve A.3’te verilen performans göstergelerine göre gelecek tahmini yine en az hatayı veren Holt’s yöntemiyle yapılmıştır. 2021-2035 yılları için oluşması beklenen ACT miktarları Şekil 6.10’da yer almaktadır. Ayrıca bu senaryolarda oluşması beklenen atık miktarları ve getirileri de detaylı olarak verilmiştir (Bknz. Şekiller A.1-A.8). Ürün ömrünün 1 yıllık değişimine bağlı olarak gelecek tahmininde elde edilen ve Şekil 6.10’da görülen ilginç bulgu şudur ki, oluşan ACT miktarları 2027 yılında üç senaryo için birbirine yakınsamaktadır. Bütünsel olarak da sonuçlara bakıldığında mobil abone penetrasyon oranı 2020’de % 98,2 ile büyük bir doyuma ulaşmış gibi görünmektedir (2021). Bu nedenle senaryoların birbirine yakınsıyor olması şaşırtıcı olmamakla birlikte, kısa ve orta vadede oluşacak ACT miktarı için önümüzdeki 15 yıl içinde artışın yine de devam edeceği ancak sıçrama olmayacağı öngörülmektedir.



Şekil 6.10:Farklı ürün ömürlerine göre oluşacak olan ACT miktarları

Duyarlılık analizinde ikinci ve üçüncü değişkenler olarak dikkate alınan birim cep telefonundaki malzeme miktarı ve malzeme fiyatlarının çıktılara etkisi ise sırasıyla Tablo 6.7 ve Tablo 6.8’de verilmiştir. Tablo 6.7’de görüldüğü üzere, bir cep telefonunda kullanılan altın miktarında %1’lik bir değişim olursa bunun 2020 yılında oluşan atık altın miktarına etkisi 3,53 kg olacaktır. Bu değişim her bir malzeme için ele alındığında %1’lik bir değişim gerçekleştiğinde 2020 yılı için toplam etki yaklaşık 2,5 tonluk bir farka neden olmaktadır. Aynı şekilde her bir malzemenin fiyatındaki %

1'lik değişimin etkisi sadece 2020 yılı için 0,4 milyon ABD dolarını aşmaktadır (Tablo 6.8). Malzeme miktarı ve fiyatlarında zamanla mutlaka değişimler olacaktır. Ancak bu analizin öncelikli amacı, %1'lik bir değişimin bile üretim, geri dönüşüm ve geri kazanımda kazanç ve kayıp açısından neler yaratabileceğini ortaya koymaktır. Bu miktarlar, bu çalışmada sadece 2020 yılında Türkiye'de oluşan ACT'ler için hesaplanmıştır. Bu değerler önemli bir kayıp/kazanç olarak değerlendirilebilir. Bu hesaplamanın cep telefonlarının yanı sıra Türkiye'deki ve dünyadaki tüm AEEE türleri için yapıldığını varsaydığımızda, kullanılan/geri kazanılan malzeme miktarı ve getirisi çok daha fazla olacaktır.

Tablo 6.7: Bir cep telefonundaki her bir malzeme miktarının %1 değişiminin etkisi

Değişim Birim	Au	Pd	Co	Au	Pt	Cu	Ni	Al	Zn	Pb	Toplam	
Malzeme Miktarı	kg	3,53	1,39	585,03	22,66	0,37	1300	139,29	269,30	92,86	55,72	2470,14

Tablo 6.8: Bir cep telefonu için her bir malzeme fiyatının %1 değişiminin etkisi

Değişim Birim	Au	Pd	Co	Au	Pt	Cu	Ni	Al	Zn	Pb	Toplam
Getiri	US\$	219.346	101.948	47.972	17.691	11.767	13.421	4.627	929403	137	418.240

6.6.5 Sonuçların Tartışılması ve Diğer Tartışma Konuları

Bu alt bölümde, hesaplamalı sonuçlar özetlenmiş ve ek tartışmalar sunulmuştur.

Tezin bu bölümünde, genel bir e-atık tahmin modeli önerilmiş ve Türkiye için ACT miktarı tahmin edilmiştir. Önerilen yaklaşım, iki aşamalı bir e-atık miktar belirleme stratejisi izlemektedir. İlk aşamada, oluşan ACT miktarı 2001–2020 dönemi için DD yöntemiyle tahmin edilmiştir. ACT miktarının 2001 yılından bu yana arttığı ve 2020 yılında 9 milyon adete ulaştığı tahmin edilmiştir. Burada en büyük zorluklardan birinin e-atık tahmin literatüründeki veri eksikliği olduğunu belirtmekte fayda vardır. Gerçek ACT verileri, daha önce de belirtildiği gibi, Türkiye için kaydedilmemiştir. Bu nedenle, literatürdeki çalışmaların çoğuna benzer şekilde, bu zorluğun üstesinden gelmek için bu aşama kullanılmaktadır. Yani satıştan e-atığa geçiş için bir metodoloji benimsenmelidir. İkinci aşamada, ACT miktarı 2021–2035 dönemi

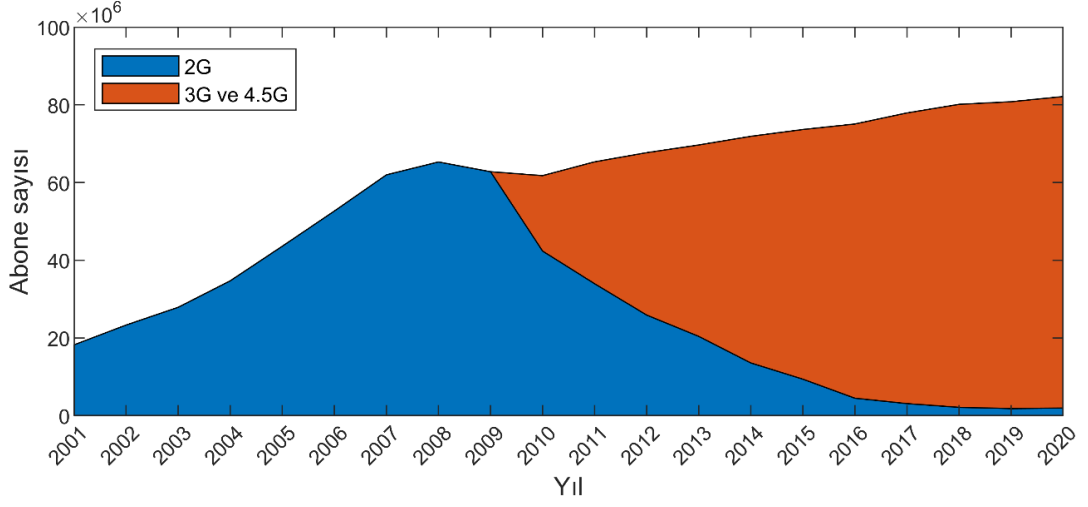
için tahmin edilmiştir. Tahmin doğruluğunu artırmak için, farklı performans metrikleri kullanılarak farklı tahmin yöntemleri ile karşılaştırmalı bir modelleme işlemi yapılmıştır. Sonrasında daha iyi performans gösteren Holt's yöntemi, gelecek projeksiyonu için tahmin yöntemi olarak seçilmiştir. Tahmin sonuçları, 2021'de 9 milyon olan ACT miktarının 2035 yılında 11,5 milyona ulaşacağını göstermiştir. Türkiye'nin nüfusu 2022'de 84,7 milyona ulaşmış olup, ACT miktarı 9,5 milyon adet olarak tahmin edilmiştir. Teknolojinin değişim hızı düşünüldüğünde her 100 kişiden 11'inin telefonunun e-atık haline getirmesi hiç de şaşırtıcı değildir. Ayrıca, Şekil 6.4'te ACT'lerdeki artış doğrusal görünmesine rağmen, büyüme hızı zamanla azaldığı için doğrusal olmadığı da belirtilmelidir. Başka bir deyişle, tahmin dönemi için büyüme oranı, 1,016'dan 1,013'e üstel azalma davranışı sergilemektedir. Ayrıca mobil penetrasyon oranı ve nüfus artış hızı da Türkiye için benzer davranış sergilemektedir.

Ayrıca, 2001–2035 yılları için potansiyel ACT kaynaklı malzeme miktarları ve getirileri hesaplanmıştır. Sonuçlar her yıl yüzlerce ton atık malzemenin oluştuğunu ortaya koymuştur. 2023 yılında 261 ton atık malzemenin oluşacağı tahmin edilmiştir. Bu miktarın ekonomik karşılığı paranın bugünkü değeri ile 43,8 milyon dolardır. Çevre ve insan sağlığı açısından tehlikeli madde miktarı da bu trende paralel olarak artmaktadır. Ek olarak, problemin ana girdileri olan kullanım ömrü, malzeme fiyatı ve malzeme miktarlarındaki değişimler için de bir duyarlılık analizi yapılarak değişimlerin çıktılara etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.

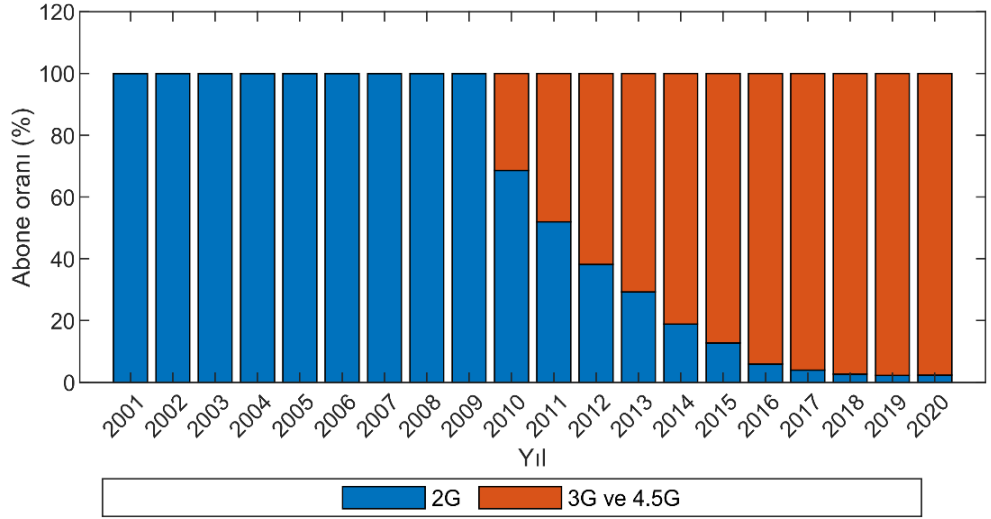
Tüm bu çalışmalara ilave olarak, çalışmada yanıtlanan ek tartışma soruları da mevcuttur: Atık malzeme miktarlarının oluşumunda ve hesaplanmasında cep telefonları ile akıllı telefonlar arasında fark var mıdır? Paranın zaman değerinin malzeme getirine etkisi var mıdır?

Ne yazık ki, Türkiye'de atık malzemenin ne kadarının hücrel ne kadarının akıllı telefonlardan kaynaklandığına dair bir kayıt yoktur. Ancak mobil abone sayılarına göre bir çıkarım yapmak mümkündür. 2001–2020 yılları dikkate alındığında bu döneme ait 2G ve 2G üzeri (3G ve 4.5G) mobil abone sayıları Şekil 6.11(a)'da görülmektedir. Bu verilere göre abone sayısının arttığı görülmektedir. Genel olarak, cep telefonları 2G uyumludur, akıllı telefonlar ise 3G ve 4.5G uyumlu mobil cihazlardır. 3G Türkiye'de 2009 yılının ikinci yarısında kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknolojik değişimin ışığında akıllı telefon kullanıcı sayısında önemli bir artış

yaşanmıştır. Bununla ilgili olarak, abone türlerinin oransal olarak değişimi Şekil 6.11(b)'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.11: (a) Abone sayısı; (b) abonelerin yüzde dağılımı

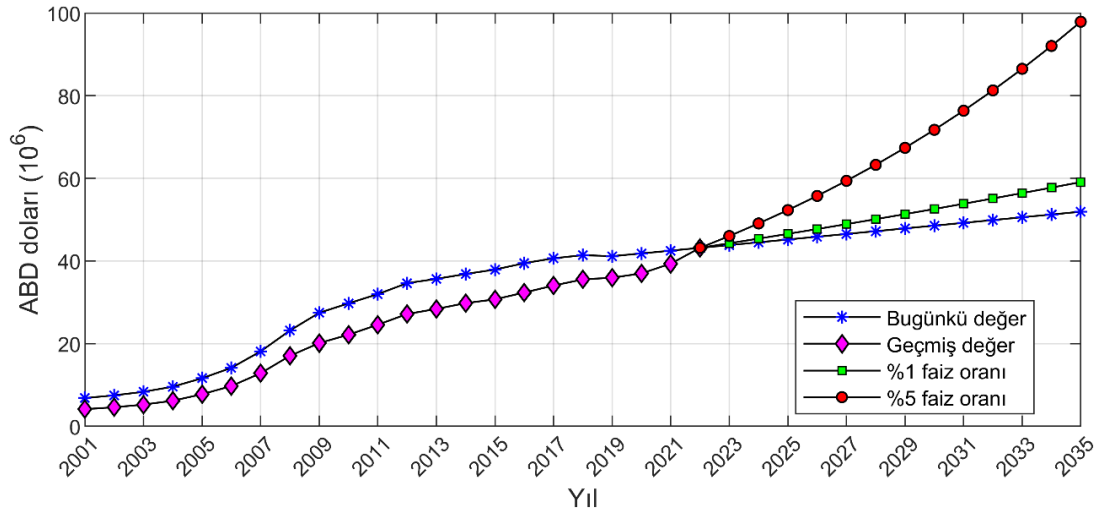
Her yıl oluşan ACT miktarının, abonelerin kullandığı mobil cihaz türü ile aynı olduğu varsayımına dayanarak, oluşan atık malzemelerinin ne kadarının hücreli cep telefonlarından ne kadarının akıllı telefonlardan kaynaklandığını hesaplamak mümkündür. Cep telefonu satışları ve toplanan ACT'ler sınıflandırılmadığı için bu varsayım yapılmıştır. Ancak hücreli cep telefonlarının ve akıllı telefonların malzeme yoğunluklarının farklı olduğu da gözden kaçmamalıdır. Singh ve diğ. (2018) ile Singh

ve diğ. (2019) çalışmalarında 10 adet hücresel cep telefonu ve 10 adet akıllı telefonun malzeme analizini yapmışlardır. Bu cihazlarda bulunan ortalama malzeme miktarlarına ait katsayılar Tablo A.4'te hesaplanmıştır. Örneğin, bir cep telefonundaki Cu ve Co miktarı bir akıllı telefondan daha azdır; ancak akıllı telefonlarda bulunan Pb miktarı hücresel cep telefonlarındaki miktarın yaklaşık 4 katı, Ni miktarı ise 2,2 katıdır. Bu malzeme oranları ve mobil abone türü oranları üzerinden her yıl için gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Telefon türüne dayalı sonuçlar Tablo A5'te listelenmiştir. Örneğin, 2013 yılında atık hücresel cep telefonlarının oranı, üretilen toplam ACT'lerin %29,28'i kadardır. Ancak atık malzemenin %28,64'ü hücresel cep telefonlarından kaynaklanmaktadır. Bu fark, cep telefonlarının ve akıllı telefonların farklı malzeme yoğunluklarından kaynaklanmaktadır. Akıllı telefonlar için üretilen atık Zn miktarı ise, hücresel cep telefonlarının üç katıdır. Bununla birlikte, bir akıllı telefon, bir hücresel cep telefonunun içerdiği Zn'nin 1,2 katı kadar Zn içerir. Bu farkın nedeni de 2013 yılında 3G ve 4.5G abone sayısının toplam abone sayısının %70'ini oluşturmasıdır.

Malzeme analizinin bazı kısıtlarının ve sınırlılıklarının olduğunu belirtmekte fayda vardır. Malzeme içerikleri genellikle cep telefonu üreticileri tarafından bildirilmemektedir. Bu nedenle, malzeme miktarlarını belirlemek için kimyasal analizler gereklidir. Bu analizlerde cep telefonlarının markaları, modelleri, üretim tarihleri, kimyasal karakterizasyon için kullanılan analitik yöntemler ve kullanılan cihazlar sonuçların analizinde varyasyonlara yol açabileceğinden, malzeme miktarlarının zamana bağlı değişimi incelemek ve analiz etmek zorlu bir iştir (Sahan ve diğ. 2019).

Paranın 2022 yılındaki değeri göz önüne alındığında, Şekil 6.7 ACT'lerden kaynaklı atık malzemelerin toplam getiri potansiyelini her yıl için ABD doları cinsinden göstermektedir. Ancak, bir başka tartışma konusu da malzeme getirilerinin zaman içinde nasıl değişeceği olacaktır. Bu tartışma için, malzeme getirilerinin geçmiş değerleri, 2001–2021 yılları için dolar cinsinden gerçekleşen enflasyon değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca faiz oranının %1 ve %5 olduğu senaryolar için paranın zaman değeri yaklaşımı ile gelecek değerler hesaplanmıştır. Şekil 6.12 2001–2035 yılları için malzeme getiri potansiyellerini göstermektedir. %1 ve %5 faiz oranları için ACT'lerden gelecek olan malzeme getiri potansiyelinin sırasıyla 59 ve 98 milyon ABD doları olduğu görülmektedir. Bu analizlerden, ACT malzemelerinden

elde edilecek getirilerin Türkiye ekonomisine fayda sağlayabileceği ve döngüsel ekonomiye katkı sunabileceği sonucuna varılabilir.



Şekil 6.12: Paranın zaman değerine dayalı potansiyel getiri miktarları

E-atık literatürü, Polak ve Drapalova (2012) tarafından da vurgulandığı gibi istatistiksel veri eksikliğinden muzdariptir ve elde edilen sonuçlar, çalışmalarda ürün yaşam süresi ve kullanılan tahmin yöntemleri gibi yaklaşımlardaki farklılıklar nedeniyle karşılaştırılabilir değildir. Tablo 6.9, literatüre dayalı olarak hem Türkiye hem de diğer ülkeler için oluşan ACT miktarları için genel bir çerçeve çizmektedir. Bu çalışmada en son kaydedilen veri yılı olan 2020 yılı için, kişi başına düşen toplam ACT miktarı literatürdeki sonuçlardan derlenmiştir.

Tablo 6.9: 2020 yılı için farklı ülkelerde oluşan ACT miktarları

Ülke	Toplam ACT (milyon adet)	Kişi başı ACT	15-64 yaş arası kişi başı ACT	Kaynak
Çek Cumhuriyeti	~3,5	0,327	0,510	Polak ve Drapalova (2012)
Çin	877	0,609	0,884	Guo ve Yan (2017)
Avustralya	11,14	0,434	0,673	Islam ve Huda (2019)
Yunanistan	~2,25	0,210	0,328	Kastanaki ve Giannis (2022)
Hindistan	~180	0,130	0,194	He ve diğ. (2021)
İran	~75	0,893	1,300	Rahmani ve diğ. (2014)
Türkiye	9,29	0,110	0,164	Bu çalışma

Son olarak, Türkiye için ACT tahmini yapan tek çalışma olan ve en son tahmin yılı 2012 olan Öztürk (2014)'ün çalışmasında elde edilen sonuçlarla bu çalışmanın sonuçları karşılaştırılabilir mi sorusuna cevap aranmıştır. Öztürk (2014)'de oluşan ACT miktarı 2012 yılı için 22,57 milyon adetken, bu çalışma da aynı yıl için 7,6 milyon adet tahmin edilmiştir. Sonuçlarda çıkan farklılıklar yine daha önce de bahsedildiği üzere kullanılan tahmin yöntemlerinin farklılığı ve ürün ömründen kaynaklanmaktadır. Öztürk (2014)'ün çalışmasında sabit ürün ömrü ve kullanımdaki ürün miktarı verisini kullanan C&U yöntemi ile tahmin yapılmış, ürün ömrü 3 yıl olarak varsayılmıştı. Eğer ki ürün ömrü bu çalışmada kullanılan 5,06 yıl olarak dikkate alınsaydı oluşacak olan ACT miktarı 2012 yılı için 22,57 milyon adet yerine 13,46 milyon adet olacaktı. Kullanılan tahmin yöntemlerinin farklı olması ve sonuçların doğruluğunu test edebilecek bir mekanizmanın olmaması nedeniyle bir sonucun diğerinden iyi olduğu yorumunu yapmak henüz mümkün değildir.

6.7 Sistemik Hibrit Tahmin Yaklaşımı – Genel Sonuçlar

Tezin bu bölümünde, genelleştirilmiş bir e-atık tahmin yaklaşımı önerilmiştir. Model, Türkiye için ACT miktarını tahmin etmektedir. Dinamik ürün ömür profili ve satış verilerine dayalı olarak DD yöntemi ile 2001–2020 için oluşan olan ACT miktarı tahmin edilmiştir. Gelecek tahmini yapılmadan önce ise, dikkate alınan yedi model arasından en uygun olanı tahmin yöntemi olarak belirlenir. Türkiye'nin ACT oluşumu için, Holt's yöntemi en küçük tahmin hatasını vermiştir. 2021-2035 yılları için ATC miktarları tahmin edilirken, 2001 yılından 2035 yılına kadar olan tüm dönemler için ATC'lerden elde edilecek malzeme miktarı ve getiri potansiyelleri de tahmin edilmiştir. 2001 yılında 1,5 milyon adet ACT oluşurken, 2020 yılındaki ACT miktarı bu sayının altı katına ulaşmıştır. 2035 yılında ise yaklaşık 12 milyon adet ACT oluşacağı tahmin edilmiştir. Paranın bugünkü değerine göre, 2035 yılında ACT'erin malzeme getirisinin 50 milyon ABD dolarını aşması beklenmektedir. Ayrıca, bu dönemler için ana girdilerdeki (ürün ömrü, malzeme miktarı ve malzeme fiyatı) değişimler de analiz edilmiştir. Değişikliklerin etkisi küçük görünüyorsa da kümülatif değerleri dikkat çekici seviyededir. Ürün ömrünün bir yıl uzamasının, her yıl daha az ACT oluşacak olması nedeniyle yaklaşık bir milyon dolarlık bir maliyet

tasarrufu sağlayacaktır. Ayrıca geri kazanım ve geri dönüşüm süreçleri de malzeme tasarrufuna kritik katkı sağlamaktadır.

Bu çalışma, Türkiye için satış verileri ile dinamik ürün ömrünü kullanan ve gelecek projeksiyonu yapan ilk e-atık tahmin çalışmasıdır. Önerilen yöntem, çeşitli ürünlere ve veri yapıları için uygulanmaya elverişlidir. Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, aşağıdaki sonuçları, tartışmalar ve zorluklar çıkarılabilir:

Metodolojik olarak bilgi teknolojilerine dayalı ürünlerin e-atık tahmini sıkça ülke örnek olayları olarak çalışılmaktadır. Yapılan tahminlerin doğruluğu e-atık oluşumunun günümüzde henüz sistematik bir şekilde kaydı ve takibi yapılması mümkün olmadığından, bu çalışmada kapsamında tahmin edilen ACT miktarları için de geçerli olmak üzere, sonuçların doğruluğunun test edilmesi ve diğer ülkelerle/bölgelerle/yöntemlerle kıyaslanması mümkün değildir. Bu dezavantajı hafifletmek adına, duyarlılık analizlerine ek olarak gelecek tahmini adımında iyileştirmeye gidilebilir. Oluşan ACT miktarı için ne Türkiye ile ne de diğer ülkelerle bir kıyaslama yapmak mümkündür. Ayrıca yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemlerin en iyisinin herhangi bir yöntem olduğunu söylemek de e-atık tahmini konusunda çok iddialıdır. Hava durumu, elektrik tüketimi gibi nesnel yöntemlerle ölçülebilir ve kaydı tutulabilir bir yapıya sahip olmayan e-atık oluşum sürecinin barındırdığı belirsizlikler ne zaman piyasaya sürülen her bir elektronik cihaza çip veya herhangi bir teknoloji ile takip cihazı takılır, bu ürünler üretiminden geri dönüşüm sürecine kadar takip edilip ne kadar süre kullanıldı, kaç kez kullanıldı (2. el, 3. el), kaç defa tamir edildi, hangi aksamaları değişti gibi bilgiler tutulur ise o gün ortadan kalkacaktır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında da belirsizlikleri modelleyebilmemiz mümkün olmasa da sistemi en iyi şekilde modellemede amacı altında farklı tahmin yöntemleri dikkate alınmış, çıktılara etki eden temel faktörler için duyarlılık analizleri yapılmıştır. Böylelikle e-atık yönetim sürecine destek sağlamak adına karar vericilere belirli şartların değişmesinin sonuçlara etkisinin ne olacağının gösterilmesi noktasında sonuçlar üretilmesi hedeflenmiştir. Farklı tahmin yöntemlerinin kullanılması gerekliliğinin tartışmaya açılmasındaki temel motivasyon da, değişen ürün, pazar, satış, bölge yapılarına göre tahmin yapmak için tek bir katı yöntem yerine (sadece Lojistik, sadece Holt's, sadece ARMA vb.), bu yöntemlerin ilgililenen örnek olay için uygun olanının seçilmesi yoluyla, görece yeni bir alan ve kendine özgü belirsizlikleri ve zorlukları olan e-atık tahmini konusunda, belirli sınırlar dahilinde güçlü tahminler yapılarak elde edilen sonuçların güvenilirliğinin ve etkililiğinin artırılmasıdır. Bu

nedenle, bu tahmin çalışmasından elde edilen sonuçların, Türkiye ve diğer tüm ülkeler için güvenilir ve sürdürülebilir bir e-atık yönetim sisteminin yapılandırılması için kıymetli olduğu düşünülmektedir. Ayrıca e-atıkların kayda değer miktarda malzeme ve getiri potansiyelleri vardır. Bu nedenle bu sonuçlar, yeni üretimler için malzeme talebinin karşılanmasına da yardımcı olacaktır.

Türkiye için oluşan atık cep telefonu miktarına bağlı toplam atık malzeme miktarları ve potansiyel ekonomik getirilerinin sonuçları da göstermektedir ki, her yıl onlarca ton atık malzeme geri kazanılmadığı takdirde çöp olmakta, milyonlarca dolar değerindeki kıymetli metal ve malzemelerin potansiyel ekonomik getirisinden istifade edilememektedir. Türkiye için sadece atık cep telefonlarının sahip olduğu potansiyel getiriye ek olarak diğer atık elektronik ürünler de dikkate alınacak olursa, e-atıkların ciddi bir ekonomik getiri sağlayacağı ve döngüsel ekonomi için büyük bir girdi kaynağı oluşturduğu görülmektedir ortadadır. Aynı zamanda bu miktarlar küresel olarak düşünüldüğünde, kaynakları kıt ve hızla tükenme noktasına gelen dünyamız için döngüsel ekonomiye katkı sağlama noktasında e-atıkların geri kazanımı konusu ciddi bir rol üstlenecek, üretim süreçleri için hazır bir maden kaynağı olacaktır. Unutulmamalıdır ki yapılan bu hesaplamalar malzemelerin %100 oranında geri kazanımının yapıldığı varsayımına dayanmaktadır. Türkiye 2017 yılında piyasa sürülen ürün miktarının sadece %3'ünü toplayarak hem AB ülkelerinin hem de ulusal hedeflerin oldukça gerisinde kalmıştır (Akpulat 2020b). Bu da göstermektedir ki gelecek yıllarda, ürünlerin tasarım ve üretim süreci de dahil olmak üzere, uygun yöntemlerle en yüksek performansı elde edecek şekilde geri kazanım teknolojilerine ihtiyaç duyulacaktır.

Malzeme analizinin bir başka boyutu da son yıllarda elektrikli araçlara olan talebin artması ve malzeme fiyatlarında meydana gelen sıçramalardır. Elektrikli araçlar ve şu an öngöremeyebileceğimiz teknolojik gelişimlere de bağlı olarak malzeme fiyatlarında gerçekleşebilecek olan sıçramaları kestirmek iyice güçleşmektedir. Her ne kadar belirli materyallerin fiyatlarında son yıllarda sıçramalar gerçekleşmiş olsa da batarya teknolojilerinde gelişim ve yeniliklerle birlikte değişimlerin yönü de farklılaşabilir. Ayrıca piyasa şartlarını iklim krizi, enerji krizi, merkez bankalarının faiz kararları, salgınlar ve ülkeler arası gerilimler gibi farklı konular da etkilemektedir. Özetle söylenebilir ki, şu an her bir materyalin tozu-zerresi dahi kıymetlidir ve dünyamız çoğalamadığı için de bu kıt kaynakların en etkili şekilde geri kazanımı zorunluluktur.

Ayrıca, bu çalışmada ele alınan veriler ve yapılan analizler DE stratejilerini desteklemektedir. Örneğin, "yeniden düşünme, azaltma ve yenileme" satış miktarlarını etkiler, "yeniden kullanım ve onarım" ürün ömrüyle doğrudan ilişkilidir ve "geri kazanım, geri dönüşüm ve yeniden üretim" oluşacak e-atık ve atık malzeme miktarlarını etkiler.

Bu çalışmanın bulguları, e-atık yönetiminin iyileştirilmesi için politikacılar, elektronik eşya satıcıları, tüketiciler, yatırımcılar, girişimciler ve farklı disiplinlerden araştırmacılar gibi tüm paydaşlara ve uygulayıcılara yardımcı olacaktır. Örneğin, tahmin ve analiz edilen ACT miktarları, geri kazanım merkezlerinin yer seçimi ve kapasiteleri ile ilgili karar verme süreçlerinde, toplama hedeflerinin belirlenmesinde, teşvik planlarının geliştirilmesi vb. farklı alanlarda kullanılabilir.

ACT ve diğer e-atık tahminlerinin başarısı için, elektronik cihazların etkin bir şekilde izlenmesi, veri kayıtlarının sistematikleştirilmesi, geri dönüşüm ve geri kazanımı konusunda toplumsal farkındalığın artırılması ve bu sürecin yasa ve yönetmeliklerle kontrol, destek ve takibinin yapılması gerekmektedir.

7. E-ATIK TAHMİNİ İÇİN TRİGOMETRİ TABANLI AYRIK GRİ MODEL VE TÜRKİYE UYGULAMASI

Disiplinler arası bir yaklaşım olan gri sistem teorisi, küçük örneklem ve zayıf bilginin yer aldığı problemlere çözüm bulabilmek için 1980'li yılların başında Deng Ju-Long (1982) tarafından ortaya atılmıştır. Gri sistem teoride, herhangi bir sisteme ilişkin tüm bilgiler biliniyorsa bu tür sistemler için beyaz sistem, hiçbir bilgi bilinmiyorsa siyah sistem, kısmen bilgi sahibi olunan sistemler için de gri sistem tanımlamaları kullanılmaktadır. Gerçek hayatta her sistem her zaman bazı belirsizliklere sahip olduğundan dolayı gri bir sistem olarak düşünülebilir. Herhangi bir sistemin hem içinden hem de dışından kaynaklanan gürültü nedeniyle, bu sistemle ilgili ulaşabileceğimiz bilgiler her zaman belirsiz ve kısıtlıdır (Kayacan ve diğ. 2010). Gri sistem teorisinin ortaya çıkışındaki temel yaklaşım, stokastik veya bulanık yöntemlerle sonuçlandırılmayan belirsiz sistemlerin tepkilerini ya da analizlerini sınırlı sayıda veri yardımı ile tahmin etmektir. Belirsizlik ve eksik bilgiye karşı başarılı sonuçlar elde etmek zor olduğundan dolayı, gri sistem teorisi bu başarıyı sağlayabilme kabiliyeti nedeniyle tercih edilmektedir (Aydemir ve diğ. 2013).

Gri model ise verinin az ve belirsiz olduğu durumlar için güvenilir ve doğru sonuçlar veren oldukça kullanışlı bir tahmin yöntemidir. Geleneksel tahmin yöntemlerinin aksine, gri modeller sistemin davranışını tahmin etmek için az sayıda veriye ihtiyaç duyar. Eksik veya yetersiz bilgi zorluğunun yaşandığı birçok durum vardır. Basit bir motor kontrol sistemi bile, sistemin zamanla değişen parametreleri ve ölçüm zorlukları nedeniyle her zaman bazı gri özellikler içerir. Benzer şekilde, çeşitli sosyal ve ekonomik faktörler nedeniyle bir bölgenin elektrik tüketimini doğru tahmin etmek oldukça zordur. Bu faktörler genellikle rastgeledir ve doğru bir model elde etmeyi zorlaştırır (Kayacan ve diğ. 2010). E-atık tahmin problemi de veri kayıtlarının bulunulan zamana kadar kısıtlı olması nedeniyle benzer belirsizlikler ve problemler içermektedir. Ayrıca e-atık tahmini birçok değişkenden etkilenmekte olup bu verilerin elde edilmesi oldukça güçtür. Gri modeller, bir zaman serisinin gelecekteki değerlerini, tahmin edicinin pencere boyutuna bağlı olarak sadece en yeni verilere dayanan bir dizi tahmin eder. Gri modellerde kullanılacak tüm veri değerlerinin pozitif olduğu ve genellikle zaman serisinin örnekleme sıklığının sabit olduğu

varsayılmaktadır. En basit açıdan, gri modeller bir çeşit eğri uydurma yaklaşımları olarak görülebilir.

Gri sistemler teorisinde, klasik bir gri model, m derece ve n değişken sayısını göstermek üzere 2-tuple (demet), $GM(m, n)$ olarak ifade edilir.

E-atık oluşumu, barındırdığı belirsizlikler nedeniyle ve doğrusal olmayan bir veri yapısına sahip olduğundan ve kayıtlı veri sayısı az olduğundan, literatürde e-atık tahmininde gri modeller kullanılmıştır (Duman ve diğ. 2019; He ve diğ. 2021; Kiran ve diğ. 2021). Bu tez kapsamında, e-atık oluşumunu tahmin etmek için literatürdeki gri modeller arasına girebilecek ve rekabet edebilecek etkili bir ayrık gri model önerilmiştir. Bu model doğrusal olmayan veri yapılarını modelleme ve tahmin yeteneğine sahiptir. Önerilen model tek değişkenlidir ve trigonometrik ifadeler içermektedir. Bu yapı, $DGM(1,1)$ 'in doğrusallık dezavantajını kullandığı trigonometrik fonksiyonlar sayesinde ortadan kaldırır. Ayrıca önerilen modelin doğrusal parametreleri en küçük kareler tahmin yöntemi ile doğrusal olmayan parametreleri ise meta sezgisel bir algoritma olan Jaya algoritması ile optimize edilmektedir. Önerilen modelde Jaya algoritmasının kullanılmasının sebebi popülasyon sayısı ve iterasyon sayısı dışında kendine özgü parametrelere ihtiyaç duymamasıdır.

7.1 Gri Modellere Genel Bakış

Çalışma kapsamında e-atık tahmini için TBDGM(1,1) önerilmiş olup, önerilen yöntemden önce izleyen alt bölümlerde Gri Model $GM(1,1)$ ve Ayrık Gri Model $DGM(1,1)$ anlatılmıştır.

7.1.1 Gri Model (Grey Model, $GM(1,1)$)

Gri modellemenin standart ve basit formu $GM(1,1)$ 'dir. Diğer gri modeller bu model üzerinden türetilmiş olup, bu model birinci dereceden bir değişken içeren problemleri ifade etmektedir. Veri sayısının 4 ve üzeri olduğu durumlarda tahmin yapmak için kullanılan bu modelin adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Başlangıç verileri kullanılarak Denklem (7.1)'de gösterilen $x^{(0)}$ ham veri seti oluşturulur.

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)), \quad n \geq 4 \quad (7.1)$$

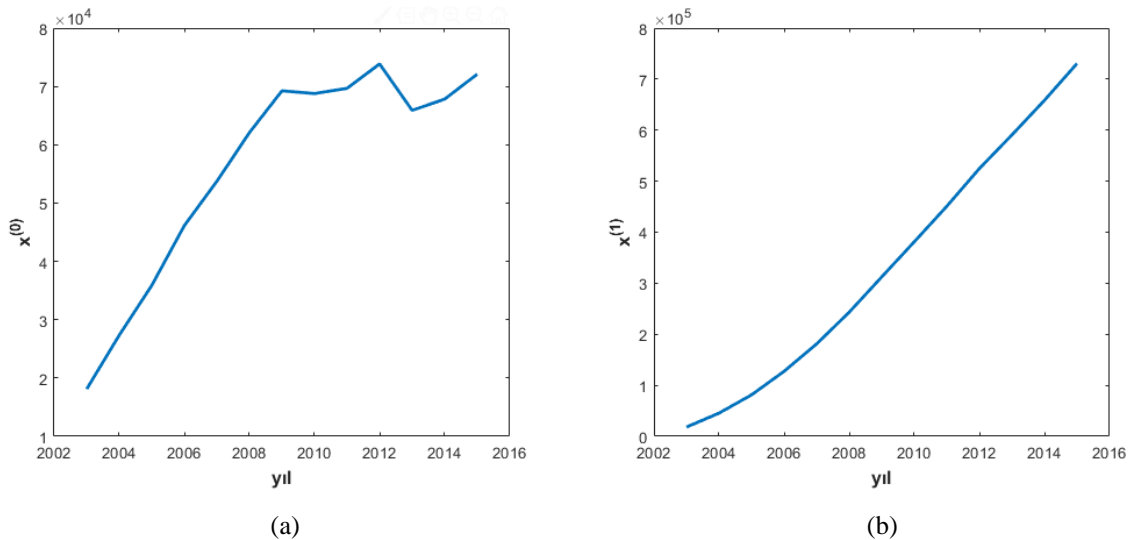
Adım 2: Denklem (7.3)'te verilen birinci dereceden birikimli üretim işlemi (Accumulating Generation Operation (1-AGO)) kullanılarak Denklem (7.2)'de yer alan $x^{(1)}$ oluşturulur.

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)) \quad (7.2)$$

Burada

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (7.3)$$

Adım 1'deki ham veri dizisi, Adım 2'de birikimli veri dizisi haline getirilmektedir. Bunun sebebi Şekil 7.1'de de görüldüğü üzere birikimli veri dizisi daha düzgün bir yapıdadır. Bu özellik gri modelin diğer modelleme yöntemlerinden farklılaştığı noktadır. Daha düzgün bir veri yapısına geçiş yapılarak model uydurma gerçekleştirilir. Kaotik veya rassal yapıdaki verilerin olduğu durumda ise ham veri seti ile oluşturulan birinci dereceden birikimli veri dizisi yeterince düzgün olmayabilir. Bu durumda birinci dereceden birikimli veri dizisi kullanılarak yeniden ikinci dereceden birikimli üretim işlemi gerçekleştirilebilir.



Şekil 7.1: (a) Ham veri seti ($x^{(0)}$); (b) Birikimli veri seti ($x^{(1)}$)

Adım 3: GM(1,1) modelini biçimlendirmek ve model katsayılarını bulmak amacıyla Denklem (7.4)'te verildiği şekilde birinci dereceden gri diferansiyel denklemi oluşturulur.

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b, \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (7.4)$$

Burada durulaştırma Denklem (7.5)'te verildiği gibidir:

$$z^{(1)}(k) = wx^{(1)}(k) + (1 - w)x^{(1)}(k - 1) \quad (7.5)$$

Eşit ağırlıklı durulaştırma yöntemi kullanıldığında arka plan değeri $w = 0,5$ alınır. Duman ve diğ. (2019) tarafından yapılan e-atık tahmin çalışmasında arka plan değerinin optimize edilen değişkenlerden biri olduğunu belirtmekte fayda vardır.

Adım 4: a ve b parametreleri en küçük kareler tahmini (Least Squares Estimation-LSE) yöntemiyle Denklem (7.6) ve Denklem (7.7) kullanılarak kestirilir.

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (7.6)$$

$$A = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

Burada A regresyon matrisi ve Y çıkış vektörüdür.

Adım 5: $\frac{dx^{(1)}(k)}{dk} + ax^{(1)}(k) = b$ şeklinde verilen beyazlaştırma denklemi çözülür ve

Denklem (7.8) kullanılarak birikimli tahmin sonucu elde edilir.

$$\hat{x}^{(1)}(k) = \begin{cases} x^{(0)}(1), & k = 1 \\ \left[\left(x^{(1)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a} \right], & (k = 2, 3, \dots) \end{cases} \quad (7.8)$$

Adım 6: Birinci dereceden ters birikimli üretim işlemi (Inverse Accumulation Generation Operator, 1-IAGO) kullanılarak ham verilerin tahmin değerleri Denklem (7.9)'da verildiği gibi elde edilir.

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k - 1) \quad (7.9)$$

7.1.2 Ayırık Gri Model (Discrete Grey Model, DGM(1,1))

GM (1,1) modelini biçimlendirmek ve model katsayılarını bulmak için ayırık yapılı fonksiyon, tahmin yapmak için ise sürekli yapılı fonksiyon kullanılmaktadır. Xie ve

Liu (2005) GM (1,1) modelinde ayrık fonksiyondan sürekli fonksiyona geçiş esnasında modelleme, bilgi bozulması ve tahmin hatasına neden olan problemleri ortadan kaldırmak için DGM(1,1) modelini önermişlerdir. Ayrık gri tahmin modelinin adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Başlangıç verileri kullanılarak Denklem (7.10)'da ifade edilen $x^{(0)}$ ham veri seti oluşturulur.

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)), \quad n \geq 4 \quad (7.10)$$

Adım 2: Denklem (7.12)'de verilen birinci dereceden birikimli üretim işlemi (Accumulating Generation Operation, 1-AGO) kullanılarak Denklem (7.11)'de yer alan $x^{(1)}$ birikimli veri serisi oluşturulur.

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)) \quad (7.11)$$

Burada

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (7.12)$$

Adım 3: DGM(1,1) modelinin Denklem (7.13)'te kapalı formu verilen ayrık denklemi oluşturulur.

$$x^{(1)}(k+1) = \beta_1 x^{(1)}(k) + \beta_2, \quad k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (7.13)$$

Adım 4: Oluşturulan modelin parametreleri Denklem (7.14)'te verildiği şekilde LSE yöntemi ile kestirilir.

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (7.14)$$

Buradaki A regresyon matrisi ve Y çıkış sütun vektörü Denklem (7.15)'te verildiği gibi elde edilir.

$$A = \begin{bmatrix} x^{(1)}(1) & 1 \\ x^{(1)}(2) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x^{(1)}(n-1) & 1 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} x^{(1)}(2) \\ x^{(1)}(3) \\ \vdots \\ x^{(1)}(n) \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

Adım 5: Adım 4'te bulunan parametreler, Adım 3'teki denklemde yerine koyularak, yinelemeli olarak birikimli zaman cevabı Denklem (7.16)'ya göre tahmin edilir.

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \beta_1^k (x^{(0)}(1)) + \frac{1 - \beta_1^k}{1 - \beta_1} \beta_2 \quad (7.16)$$

Adım 6: Birinci dereceden ters birikimli üretim işlemi (Inverse Accumulation Generation Operator, 1-IAGO) kullanılarak ham verilerin tahmin değerleri Denklem (7.17)'de verildiği gibi elde edilir.

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k-1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (7.17)$$

Literatürde yer alan diğer ayrık gri modellerin bazıları ve onların matematiksel ifadeleri Tablo A.6’da verilmiştir.

7.2 Tez Kapsamında Önerilen TBDGM(1,1) Modeli

DGM(1,1), girdi ve çıktı değişkenleri arasında doğrusal bir ilişki olduğunu varsayar. Bu varsayım, değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı veya daha karmaşık olabileceği gerçek dünya durumlarında her zaman geçerli olmayabilir. Bu nedenle, DGM(1,1) modeli doğrusal yapısı gereği bir çok veri setini modellemede yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, veri setinin doğrusal olmama ve salınımlı olabileceği durumlar göz önüne alınarak bu çalışmada TBDGM(1,1) modeli önerilmiştir. Önerilen model yaklaşımında verinin zamana bağlı doğrusal olmayan ve salınımlı değişimi, DGM(1,1) modeline trigonometrik baz fonksiyonları olan sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının eklenmesiyle sağlanmıştır. Bu baz fonksiyonlarından sinüs fonksiyonu tek, kosinüs fonksiyonu çift fonksiyon olduğu için, bu fonksiyonlar fonksiyon yaklaşılama için oldukça elverişlidirler. Bunlara ek olarak, bu iki fonksiyonun birleşimiyle doğrusal olmayan bir model yapısı oluşturulmuş; böylece DGM(1,1) modelinin doğrusal yapısından kaynaklanan dezavantajı giderilmiştir. Bu modelin uygulama adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Başlangıç verileri kullanılarak Denklem (7.18)’de ifade edilen $x^{(0)}$ ham veri seti oluşturulur.

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)), \quad n \geq 4 \quad (7.18)$$

Adım 2: Denklem (7.19)’da verilen birinci dereceden birikimli üretim işlemi (Accumulating Generation Operation, 1-AGO) kullanılarak Denklem (7.20)’de yer alan $x^{(1)}$ birikimli veri serisi oluşturulur.

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)) \quad (7.19)$$

Burada

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (7.20)$$

Adım 3: TBDGM(1,1) modelinin Denklem (7.21)'de kapalı formu verilen ayrık denklemi oluşturulur.

$$x^{(1)}(k) = \beta_1 x^{(1)}(k-1) + \beta_2 + \beta_3 \sin(\omega_1 k) + \beta_4 \cos(\omega_2 k), \quad k = 2, \dots, n \quad (7.21)$$

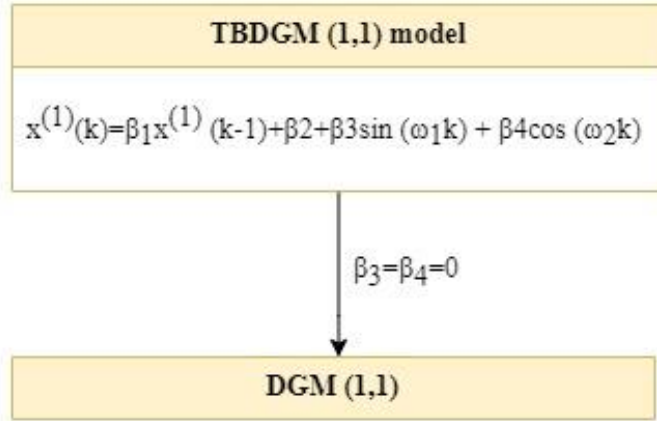
Adım 4: Oluşturulan modelin doğrusal olmayan parametreleri (ω_1, ω_2) Jaya Algoritması ile doğrusal parametreleri $(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4)$ ise en küçük kareler tahmin yöntemi ile kaskat/ilintili şekilde optimize edilir. Bölüm 7.3'te önerilen modelin parametre kestirimi detaylı olarak anlatılmıştır.

Adım 5: Adım 4'te bulunan optimum parametreler, Adım 3'te yer alan denklemde yerine koyularak, yinelemeli olarak birikimli zaman cevabı tahmin edilir.

Adım 6: Birinci dereceden ters birikimli üretim işlemi (Inverse Accumulation Generation Operator, 1-IAGO) kullanılarak ham verilerin tahmin değerleri Denklem (7.22)'de verildiği şekilde elde edilir.

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k-1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (7.22)$$

Önerilen TBDGM(1,1) ile DGM(1,1) modelleri arasındaki dönüştürülebilir ilişki Şekil 7.2'de görülmektedir.



Şekil 7.2: TBDGM(1,1) ve DGM(1,1) modelleri arasındaki ilişki

7.3 TBDGM(1,1) Modelinin Parametre Kestirimi

Jaya optimizasyon algoritması, 2016 yılında Rao (2016) tarafından önerilmiş popülasyon temelli bir meta sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, hem en iyi çözüme doğru hareket etme hem de en kötü çözümden uzaklaşma/sakınma

düşüncesine dayalı geliştirilmiştir. Jaya Algoritmasını diğer birçok popülasyon temelli meta sezgisel algoritmadan ayıran en önemli özellik, popülasyon sayısı ve maksimum iterasyon sayısı dışında algoritmaya özgü herhangi bir parametreye ihtiyacı olmadan optimizasyon sürecini gerçekleştirmesidir. Böylece, kullanıcılar algoritmaya özgü parametre ayarlama gibi zorluklarla uğraşmamaktadırlar. Ayrıca, hesaplama süresi verimliliği, hızlı yakınsama, global arama kabiliyeti ve uygulanabilirliğinin kolay olması bu algoritmanın diğer güçlü yanlarındandır.

Jaya Algoritmasının uygulama sürecinde popülasyon ve maksimum iterasyon sayısı belirlenir. Çözüm uzayının sınırları içerisinde popülasyon büyüklüğü kadar arama adayı rasgele oluşturulur/konumlandırılır ve bu adaylar kullanıcı tarafından belirlenen amaç fonksiyonunda yerine koyularak bu adayların uygunluk değerleri hesaplanır.

Algoritmada $f(x)$ en küçüklenecek (veya en büyüklenecek) amaç fonksiyonudur. Herhangi bir i iterasyonunda, n adet aday çözüm (örn. popülasyon büyüklüğü, $k=1, 2, \dots, n$), m tane karar değişkeni (ör. $j=1, 2, \dots, m$) olduğu varsayalım. $f(x)_{best}$ tüm adaylar içindeki en iyi uygunluk değerini, $f(x)_{worst}$ ise en kötü uygunluk değerini gösterebilir. i . iterasyonda k . adayın j . değişkeninin değeri $X_{j,k,i}$ olmak üzere, bu değer Denklem (7.23)'te gösterildiği gibi güncellenmektedir:

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + \tau_{1,j,i}(X_{j,best,i} - |X_{j,k,i}|) - \tau_{2,j,i}(X_{j,worst,i} - |X_{j,k,i}|) \quad (7.23)$$

$X_{j,best,i}$ j . değişkeninin en iyi adaydaki değeri, $X_{j,worst,i}$ en kötü adaydaki j . değişkeninin değeridir. $X'_{j,k,i}$, $X_{j,k,i}$ değerinin güncellenen değeri ve $\tau_{1,j,i}$ ve $\tau_{2,j,i}$ i . iterasyondaki j . değişken için üretilen $[0, 1]$ aralığındaki rasgele katsayılarıdır. “ $\tau_{1,j,i}(X_{j,best,i} - |X_{j,k,i}|)$ ” çözümün en iyi çözüme doğru yönelme, “ $-\tau_{2,j,i}(X_{j,worst,i} - |X_{j,k,i}|)$ ” ise en kötü çözümden uzaklaşma eğilimini gösteren ifadelerdir. Eğer yeni çözüm mevcut çözümden daha iyi bir uygunluk değerine sahipse, yeni çözüm popülasyona dahil edilir. Bu işlem durdurma kriteri sağlanana kadar devam ettirilir.

Önerilen TBDGM(1,1) modelinde 6 adet belirlenmesi gereken parametre ($\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \omega_1, \omega_2$) bulunmaktadır. Jaya algoritmasında ω_1 ve ω_2 parametreleri her bir aday çözüme karşılık gelmekte olup stokastik olarak optimize edilirken;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ doğrusal parametreleri ise aşağıda verilen En Küçük Kareler Tahmin yöntemi ile Denklem (7.24) kullanılarak elde edilir:

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (7.24)$$

Burada A regresyon matrisi ve Y çıkış sütun vektörü Denklem (7.25)'teki gibi elde edilir.

$$A = \begin{bmatrix} x^{(1)}(1) & 1 & \sin(2\omega_1) & \cos(2\omega_2) \\ x^{(1)}(2) & 1 & \sin(3\omega_1) & \cos(3\omega_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x^{(1)}(n-1) & 1 & \sin(n\omega_1) & \cos(n\omega_2) \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} x^{(1)}(2) \\ x^{(1)}(3) \\ \vdots \\ x^{(1)}(n) \end{bmatrix} \quad (7.25)$$

Bulunan parametre değerleri Adım 3'te yer alan TBDGM(1,1) ayrık denkleminde yerine koyularak tahmin edilen birikimli veri serisi değerleri hesaplanır. Sonrasında ise birinci dereceden ters birikimli üretim işlemi kullanılarak ham verilerin tahmin değerleri ($\hat{x}^{(0)}$) elde edilmiş olur.

Bu optimizasyon sürecinde en küçüklenmesi gereken amaç fonksiyonu ortalama hata karenin karekökü (Root Mean Square Error, RMSE) Denklem (7.26)'da verilmiştir:

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{k=1}^n (\hat{x}^{(0)}(k) - x^{(0)}(k))^2} \quad (7.26)$$

Populasyonda yer alan aday çözümler iteratif olarak evrilerek en iyi sonucu veren parametre kümesi, modelin parametre değerleri olarak belirlenmiş olur. Tahmin işlemleri bu parametre değerleri kullanılarak gerçekleştirilir.

7.4 Sistem Sınırları

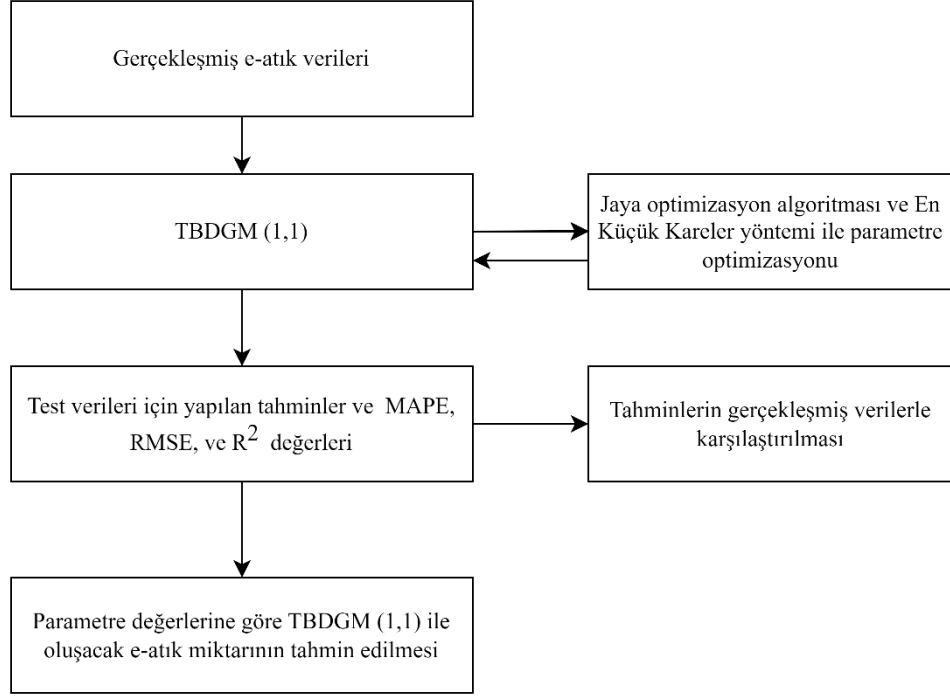
Daha önce belirtildiği gibi, e-atıklar katı atıkları oluşturan en büyük atık türlerinden biri haline gelmiştir. Tezin bu bölümünde e-atık tahmini için bir

TBDGM(1,1) önerilmiştir. Gerçek bir e-atık ortamını modellemek için Duman ve diğ. (2019)'nin 2003-2015 yılları için Tablo 7.1'de verilen veri kümesi temel alınmıştır.

Tablo 7.1: Washington eyaletinde oluşan e-atık miktarı (Duman ve diğ. 2019).

Yıl	Oluşan E-atık (ton)
2003	18.108,186
2004	27.341,564
2005	35.877,901
2006	46.126,412
2007	53.737,464
2008	62.071,464
2009	69.246,269
2010	68.777,911
2011	69.673,018
2012	73.851,238
2013	65.894,784
2014	67.822,933
2015	72.103,408

Önerilen modelde, gelecek tahmini aşamasından önce tahmin doğruluğunu artırmak için optimum ve optimuma yakın parametre değerleri elde edilmiştir. TBDGM(1,1)'ye ait model parametreleri meta sezgisel Jaya Algoritması ve En Küçük Kareler Tahmini yöntemleri ile optimize edilmiştir. Bu yöntemin akış şeması Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.3: TBDGM(1,1) akış şeması

7.5 E-atık Oluşumunun Tahmini

Daha önce de belirtildiği gibi, tezin bu bölümünde Tablo 7.1’de verilen 2003-2015 yıllarına ait Washington Eyaleti e-atık verileri kullanılmıştır. 2003-2014 verileri modellenmiş, test ve karşılaştırma için 2015 yılı kullanılmıştır. Test aşamasından sonra tüm veriler yeniden modellenerek model parametreleri tahmin edilmiştir. Tahmin edilen bu değerler ile 2016-2025 yılları için gelecek projeksiyonu yapılmıştır.

Hesaplamalar, Intel(R) Core (TM) i7-8700 CPU 3.20 GHz işlemci, 16 GB RAM ve 64-bit Windows 10 işletim sistemine sahip bir bilgisayarda MATLAB (R2018a) platformunda gerçekleştirilmiştir. JAYA algoritmasının konfigürasyonunda popülasyon sayısı 30 olarak ayarlanmıştır ve maksimum iterasyon sayısı 100 olarak tanımlanmıştır. $\tau_{1,j,i}$ ve $\tau_{2,j,i}$ için aralıklar (0,1) ile sınırlandırılmıştır. 2003-2015 yılları için TBDGM(1,1) ile tahmin edilen e-atık miktarı Tablo 7.2’de verilmiştir.

Tablo 7.2: Washington Eyaleti veri kümesi ile elde edilen tahmin değerleri

Yıl	Gerçekleşen	Tahmin edilen
2003	18.108,19	18.108,19
2004	27.341,56	26.683,79
2005	35.877,90	36.219,60
2006	46.126,41	47.446,64
2007	53.737,46	52.726,85
2008	62.071,46	61.715,43
2009	69.246,27	69.512,34
2010	68.777,91	68.793,02
2011	69.673,02	70.509,96
2012	73.851,24	72.093,49
2013	65.894,78	67.175,51
2014	67.822,93	67.621,46
2015	72.103,41	71.996,89

7.5.1 Karşılaştırmalı Analizler

TBDGM(1,1) modelinin tahmin kabiliyetini değerlendirmek için iki tür karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. İlki iyi bilinen DGM modeller, bu veri kümesi için çalıştırılmıştır. Bu modeller DGM, NDGM, TDGM, QDGM ve CDGM'dir. Ayrıca sonuçlar literatürde Duman ve diğ. (2019)ve Wang ve diğ. (2021) tarafından bildirilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. *RMSE*, R^2 ve *MAPE* değerleri modelleme (2003-2014), test (2015) ve tüm dönem (2003-2015) için hesaplanmıştır. Modelleme ve test yıllarına ait sonuçlar Tablo 7.3 ve Tablo 7.5'te verilmiştir.

Tablo 7.4 ve Tablo 7.6'da ise genel modelleme sonuçlarını göstermektedir. TBDGM(1,1) modeli tüm durumlar için en iyi performans değerlerini vermiştir.

Tablo 7.3: Modellerin eğitim ve test performans değerleri

Eğitim / Test	Gösterge	DGM	NDGM	TDGM	QDGM	CDGM	TBDGM
Eğitim (2003-2014)	MAPE	14,2109	5,0193	2,4817	2,0314	1,9571	1,2177
	R ²	0,7964	0,9715	0,9905	0,9914	0,9912	0,9976
	RMSE	8101,4877	3032,9084	1748,6279	1668,2976	1688,2464	873,4929
Test (2015)	MAPE	15,0923	0,3736	13,7875	14,1280	16,1070	0,2851
	RMSE	10882,06	269,38	9941,25	10786,80	11613,67	205,56

Tablo 7.4: 2003-2015 yılları için modellerin performansı

Gösterge	DGM	NDGM	TDGM	QDGM	CDGM	TBDGM
MAPE	14,2805	4,6782	3,4161	2,5736	1,9337	1,1577
R ²	0,7913	0,9733	0,9821	0,9869	0,9898	0,9978
RMSE	8154,7505	2915,5491	2387,3160	2044,6996	1799,5743	831,7691

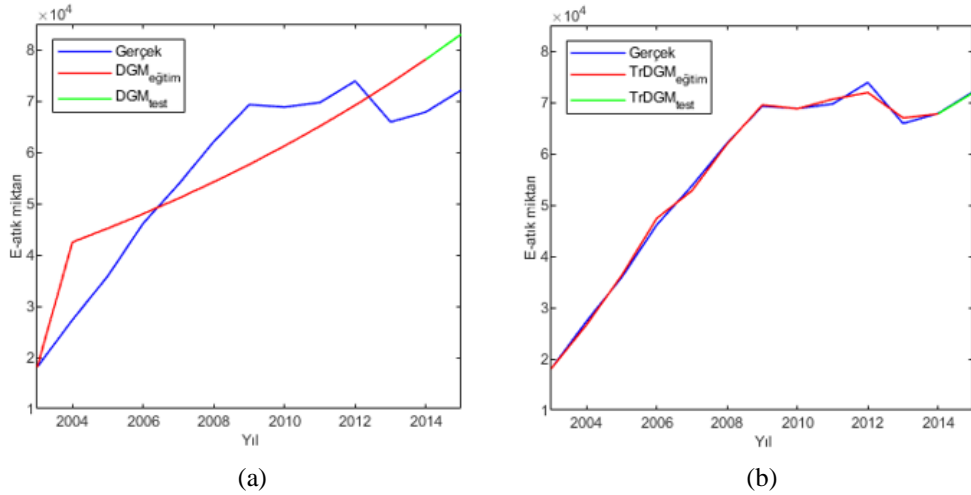
Tablo 7.5: Modellerin eğitim ve test performans değerlerinin literatür ile karşılaştırılması

		Duman ve diğ. (2019)		He ve diğ. (2021)		Bu çalışma
Eğitim / Test	Göst.	GMC (1,3)	NBGM (1,3)-PSO	VMD-DESM123-GWFM456	VMD-GVM1-DESM23-GWFM456	TBDGM (1,1)
Eğitim (2003-2014)	MAPE	2,9900	1,8000	3,0700	1,6000	1,2177
	R ²	0,9800	0,9922	0,9906	0,9963	0,9976
	RMSE	2539,9	1586,5169	1837,5746	1114,7915	873,4929
Test (2015)	MAPE	7,8424	0,3273	NA	4,2554	0,2851
	RMSE	5654,6	236,02	NA	3068,28	205,56

Tablo 7.6: 2003-2015 yılları için modellerin performansının literatür ile karşılaştırılması

	Duman ve diğ. (2019)	He ve diğ. (2021)	Bu çalışma
Gösterge	NBGMC (1,2)-PSO	VMD-GVM1 - DESM23-GWFM456	TBDGM(1,1)
MAPE	3,2700	2,7000	1,1577
R ²	0,9819	0,9922	0,9978
RMSE	2427,6555	1612,7317	831,7691

Ayrıca Şekil 7.4(a) ve Şekil 7.4(b) sırasıyla DGM(1,1) ve TBDGM(1,1) ile elde edilen sonuçları göstermektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, DGM doğrusal bir yapıya sahiptir. Bu modellerin modelleme performanslarının farklı olduğu ve TBDGM(1,1) modelinin daha iyi modelleme performansına sahip olduğu şekilden de kolaylıkla görülebilmektedir.



Şekil 7.4: (a) DGM(1,1) ve (b) TBDGM(1,1) modelleri ile elde edilen sonuçlar

7.5.2 E-atık Oluşumunun Gelecek Tahmini

2016-2025 yılları için TBDGM(1,1) modeli ile gelecek projeksiyonu yapılmıştır. Tahmin edilen parametre değerleri modelde yerine koyularak Tablo 7.7’de verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 7.7: 2016-2025 yılları için tahmin edilen e-atık miktarları

Yıl	Tahmin (ton)
2016	73.090,63
2017	81.556,18
2018	95.220,66
2019	104.764,08
2020	119.131,68
2021	135.920,13
2022	145.083,53
2023	155.720,81
2024	167.280,43
2025	170.845,29

Önerilen TBDGM(1,1) modelinin sonuçları, düşük MAPE ve RMSE değerleri ve yüksek R^2 değeri ile e-atık oluşumunu modelleme kabiliyeti yüksektir. Ayrıca TBDGM(1,1) modeli test aşamasında iyi performans göstermiştir. Genel sonuçlar, TBDGM(1,1)'in ayrık gri modelin dezavantajlarını hafifletip optimizasyon avantajı ile de e-atık oluşumunu tahmin etmek için umut verici bir yöntem olduğunu göstermektedir.

7.6 TBDGM(1,1) ile Türkiye E-atık Miktarının Tahmini

TBDGM(1,1) modeli ile kabul edilebilir ve geçerli sonuçlar elde edildikten sonra oluşan e-atık miktarı Türkiye örneği için tahmin edilmiştir. 2013-2020 yılları için Türkiye Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'na beyan edilen elektrikli ve elektronik eşya atık verileri kullanılmıştır (Tablo 7.8). Tahmin dönemi 2013-2030 yılları arasındır. Bu TBDGM(1,1)'in tüm adımları bu veri kümesi için de aynı şekilde uygulanmıştır. Ayrıca karşılaştırmalı analizler tekrar yapılmıştır. Analizde test için son yıl verisi (2020) ve son iki yıla ait veriler (2019 ve 2020) kullanılmıştır. Bu analizin amacı, farklı durumlar için modelleme yeteneği anlamında önerilen modelin gücü hakkında fikir edinmektir.

Tablo 7.8: Beyan edilen e-atık miktarları

Veri no.	Yıl	E-atık (ton)
1	2013	4.911
2	2014	6.817
3	2015	32.029
4	2016	39.394
5	2017	37.326
6	2018	37.517
7	2019	46.360
8	2020	67.153

Test için iki yıllık ve son yıl verisinin kullanıldığı durumlar için sırasıyla Tablo 7.9 ve Tablo 7.10'da elde edilen eğitim ve test sonuçları verilmiştir. İlk durum için (2 yıllık test verisi), TBDGM(1,1) modelinin eğitim performansı değerleri en iyi MAPE, R^2 ve RMSE değerlerini vermiştir. DGM modeli test aşamasında daha iyi performans göstermiştir ancak TBDGM(1,1)'nin ulaştığı sonuçların MAPE ve RMSE değerleri bu değerlere çok yakındır. Benzer şekilde, QDGM ikinci durumda daha iyi çözümler sunmuştur ve bunu hemen TBDGM(1,1) izlemiştir.

Tablo 7.9: Eğitim (2013-2018) ve test performans değerleri

Eğitim / Test Göst.	DGM	NDGM	TDGM	QDGM	CDGM	TBDGM
Eğitim MAPE	47,173	2,4811	1,6016	332,0687	4467,646	0,0003
(2013-2018) R^2	0,7102	0,9951	0,9979	0,0000	0,0000	1,0000
RMSE	7889,4	1029,47	678,176	143523,5	3231865	0,1122
Test MAPE	10,143	30,4128	37,1860	2047,906	378147,1	14,887
(2019-2020) RMSE	6580	21295,77	25126,7	13171801	310201363	11515

Tablo 7.10: Eğitim (2013-2019) ve test performans değerleri

Eğitim / Test	Gösterge	DGM	NDGM	TDGM	QDGM	CDGM	TBDGM
Eğitim	MAPE	41,494	4,577	5,008	0,000	2149,421	0,025
(2013-2019)	R ²	0,767	0,969	0,979	1,000	0,000	1,000
	RMSE	7375,010	2695,405	2209,412	0,000	1105557,06	7,746
Test	MAPE	16,900	39,633	31,323	3,927	1285,466	4,607
(2020)	RMSE	11348,53	26614,42	21034,59	2637,38	863229,064	3093,49

Farklı durumlar için (hem Washington örneği hem Türkiye örneği) diğer yöntemlere göre daha istikrarlı sonuçlar üreten TBDGM(1,1) modeli ile Türkiye e-atık tahmini 2021-2030 dönemi için yapılmıştır. Türkiye örneği için tahmin edilen e-atık miktarları Tablo 7.11’de verilmiştir.

Tablo 7.11: TBDGM(1,1) ile elde edilen Türkiye e-atık tahmin sonuçları

Yıl	Tahmin (ton)
2021	96.268
2022	97.453
2023	98.710
2024	151.760
2025	210.270
2026	216.860
2027	241.550
2028	344.210
2029	441.950
2030	488.920

7.7 TBDGM(1,1)- Sonuçlar ve Tartışma

Elektronik ürün kullanımı ve e-atık üretimi tüm dünyada artmaktadır. Türkiye, 85 milyon nüfuslu gelişmekte olan bir ülke olması nedeniyle aynı zamanda büyük bir e-atık üreticisidir. Pek çok türde çevre sorunu oluşmakta ve paydaşlar döngüsel

ekonomiye katkıda bulunmak için e-atık üretimini yönetme çabası içindedir. Politika oluşturma, tesis ve kapasite planlaması, araç yönlendirme vb. gibi e-atık üretimiyle ilgili bu konuların yönetimi, doğru e-atık tahminlerini gerektirir. Son yirmi yıldır literatürde e-atıkları ölçmek için farklı türde e-atık tahmin yöntemleri önerilmiştir. E-atık sorunu göz önüne alındığında, gri modellerin sistemi sınırlı ve belirsiz veri koşulları altında çok iyi modellemesi nedeniyle, gri modeller e-atık miktarını tahmin etmek için uygun yöntemlerdir. Ayrıca, toplanan e-atık verileri kesiklidir, dolayısıyla farklı ayrık gri modeller daha farklı başarılı sonuçlar verebilir. Tez kapsamında önerilen bir TBDGM(1,1) modelin motivasyon kaynağı da bu nedenlerden çıkmıştır. Ayrıca, önerilen model, parametrelerini optimize etmek için Jaya optimizasyon algoritmasını kullanmaktadır. Washington Eyaleti ve Türkiye örneği için önerilen modelin tahmin performansını değerlendirmek için karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. TBDGM(1,1) modeli, Washington durumu için diğer gri modellerden daha iyi performans göstermiştir. Model, Türkiye verileri için de rekabetçi ve istikrarlı sonuçlar vermiştir. Önerilen yöntemin temel katkısı, TBDGM(1,1) modelinin e-atık tahmini için farklı koşullar altında kararlı ve güçlü sonuçlar üretebilmesidir. Ek olarak model, daha doğru sonuçlar için optimal/optimuma yakın model parametre katsayılarını bulmak için meta sezgisel algoritma kullanmaktadır. Tahmin sonuçları e-atık miktarının gelecekte artma eğiliminde olduğunu da göstermektedir. Bu sonuçlar bir önceki modelde olduğu gibi, tüm tüketiciler, hükümet, üreticiler, girişimler ve e-atık yönetimi ile ilgili tüm paydaşlar için değerli olabilir.

Ayrıca, burada bazı tartışma soruları da ortaya çıkabilir. Öncelikle, herhangi bir meta sezgisel yöntemin en iyi yöntem olduğunu iddia etmek mümkün değildir. Bu durum aynı şekilde gri modeller için de geçerlidir. Ancak önerilen yöntemin e-atık miktarını farklı durumlar için iyi bir şekilde modellediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, Jaya algoritması yerine herhangi başka bir meta sezgisel yöntem de kullanılabilir. Bu çalışmada uygulama kolaylığı nedeniyle Jaya algoritması tercih edilmiştir. Ayrıca, gelecekte gri modeller ile yapılacak e-atık tahmin çalışmalarında, alternatif meta sezgisel yöntemlerin performansı da derinlemesine analiz edilebilir.

8. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Son yıllarda e-atık oluşumunun hızla artması nedeniyle, e-atık tahmin çalışmalarına olan ilgi ve bu alanda akademik çalışmalara olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Dijitalleşen dünyada, e-atık oluşumunun ilerleyen yıllarda daha da artacağı ortadadır. Bu nedenle, döngüsel ekonominin temel alındığı bu yeni dünyada, e-atık yönetim süreçlerinin sağlıklı bir şekilde tasarlanıp yönetilebilmesi için e-atık tahmin verileri önemli bir girdidir. Bu amaçla, bu tez kapsamında e-atık tahmini için farklı modeller ve yaklaşımlar önerilmiştir. Bölüm 8.1’de teoriye ve uygulamaya olan katkılar verilmiştir. Bölüm 8.2’de e-atık tahmini ile ilgili araştırma alanları ve gelecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

8.1 Katkıların Özetlenmesi

E-atık tahmin çalışmalarını esasında teorik ve uygulama olarak ayırmak oldukça güçtür. Son yıllarda hızlı bir şekilde artış gösteren e-atık tahmin probleminin hem akademik çalışmalarla hem de sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomiye geçiş sürecinde uygulamalarla gelişime ihtiyacı vardır.

Tez kapsamında yapılan çalışmaların teorik alana katkıları şu şekilde özetlenebilir:

E-atık tahmin literatürü analizi sonucunda, metodolojik olarak literatürde bazı boşluklar tespit edilmiştir. İlk olarak ürünlerin farklı yaşam evrelerini dikkate alan ve yeniden kullanım, depolama vb. gibi gerçek süreçleri dikkate alan Carnegie Mellon yönteminin tahmin kabiliyetinin geliştirilmesine ihtiyaç olduğu görülmüştür. Çünkü teknolojinin hızlı değişimi ile ürün sirkülasyonu çok fazladır. Bu durum da ürün ömürlerinin zaman içinde farklılaşmasına (genellikle azalmasına) neden olmaktadır. Buradan hareketle, tez kapsamında ürün ömrünün ürünün satıldığı yıla göre farklı olabilmesine olanak sağlayan GCM modeli önerilmiştir. Böylelikle, e-atık tahmini yapılırken tüm satış periyodu boyunca sabit bir ömrü kullanmak yerine, ürün ömürleri değişken olabilmektedir. Önerilen model, tez çalışmasının başlangıcında ürün ömürlerinin zamana bağlı azalacağı varsayımına dayanarak bu tür değişimlere esnek olma kabiliyeti sağlamak üzere geliştirilmiştir. Günümüzde, döngüsel ekonominin

tüketicilerin ürünleri daha uzun süre kullanma ve yeniden kullanma gibi tüketici davranışlarını değiştirme ve belki de gelecek yıllarda ürün ömürlerinde bir artış gerçekleşmesi durumunda dahi, önerilen MCM yönteminin bu değişimleri dikkate alabilme kabiliyeti sayesinde literatüre katkı sağlamaktadır.

İkinci olarak, literatür analizi sonucunda, genelde satış verileri veya piyasada bulunan ürün miktarlarına dayalı e-atık tahmini yapıldığı, kayıtlı e-atık verilerinin eksikliği nedeni ile de yapılan tahminlerin doğruluğunun ölçülemediği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, tez kapsamında e-atık tahmini için sistematik bir hibrit tahmin yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda, satış verilerini kullanan bir girdi-çıkıtı analizi yöntemi ve gelecek tahmini için alternatif zaman serisi tahmin yöntemleri sistematik bir şekilde entegre edilmiştir. Bunun nedeni e-atık tahmin çalışmalarında kaçırılan noktanın gelecek tahmini yapılırken tek bir modelin verdiği sonuçlara dayanılarak elde edilen sonuçların doğru kabul ediliyor olmasıdır. Önerilen yaklaşım aracılığıyla, e-atık tahmininde kullanılan yöntemlere bütünsel bir biçimde bakılması gerekliliğini tartışmaya açılmış ve bu gereklilik alternatif tahmin yöntemlerinin performanslarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesiyle literatüre katkı sağlanmıştır.

Üçüncü olarak, e-atık tahmin literatürü de zamana ayak uydurmakta ve e-atık toplama sistemlerinin gelişimiyle veri kayıtları az da olsa oluşmaya başlanmıştır. Bu nedenle, e-atık miktarı gibi veri kaydının az ve sınırlı olduğu durumlarda kullanılmak üzere TBDGM(1,1) adı verilen yeni bir gri tahmin modeli önerilmiştir. Tez kapsamında önerilen bu model, doğrusal olmayan e-atık verilerini modelleyerek tahmin etme kabiliyetine sahiptir. E-atık tahmininde kullanılan veri kümelerinde, önerilen modelin literatürde yer alan diğer gri modellere göre daha iyi sonuçlar ürettiği ortaya çıkmıştır. Önerilen modelin doğrusal olmayan parametrelerinin meta-sezgisel yöntemle optimize edilmesi ve diğer yöntemlerle üstün ve rekabet edebilir sonuçlar üretiyor olması yönüyle, e-atık tahmin yöntemleri literatürüne katkı sağladığı düşünülmektedir.

Önerilen model ve yaklaşımların uygulamaya katkıları ise aşağıda belirtilmiştir:

GCM modeli, CM modelinin geliştirilmiş bir formu olup, tez kapsamında modelleme aşamasında küçük bir örnek üzerinde uygulaması yapılmıştır. Model, farklı ürün ömür seviyelerine ait gerçek verilerle uygulama yapmak için halihazırda uygundur. Önerilen yöntem, farklı ürün tipleri için tüm coğrafyalarda uygulanabilir.

E-atık tahmini için önerilen sistematik hibrit tahmin yaklaşımının uygulaması ise, Türkiye ACT tahmini için gerçekleştirilmiştir. Model, oluşan ACT miktarına bağlı olarak oluşan malzeme miktarı ve getiri potansiyellerini de dikkate alması yönüyle, Türkiye için satış verilerini ve dağılıma bağlı ürün ömrünü dikkate alan ilk uygulama çalışmasıdır. Bu bağlamda hem tahmin sonuçları hem de malzeme analizi sonucunda elde edilen bulguların uygulamaya katkı sağladığı düşünülmektedir. Aynı zamanda önerilen yaklaşım hem Türkiye hem de dünya genelinde farklı ürünlerin e-atık oluşumunu tahmin etmek için uygulamaya elverişlidir.

TBDGM(1,1) modeli ise, teorik olarak doğruluğu Washington Eyaleti verileri için sınılandıktan sonra, Türkiye e-atık tahmini uygulaması için kullanılmıştır. Beyan edilen e-atık verilerine dayalı olarak yapılan bu uygulama çalışması da Türkiye'nin e-atık oluşum eğilimini belirleme açısından uygulamaya katkı sağlamaktadır. Sistematik hibrit tahmin yaklaşımında olduğu gibi, TBDGM(1,1) modeli de ürün bazında e-atık veri kayıtları oluştuğu takdirde e-atık tahmini için uygulamaya açıktır. Aynı zamanda model, Türkiye dışında diğer ülkelerin e-atık tahmininde kullanılabilir yapıdadır.

Sonuç olarak tez çalışmasının, dögüsel ekonomi ve sürdürülebilir bir dünya için, tüm paydaşlara kıymetli bilgiler sağladığı düşünülmektedir.

8.2 Araştırma Alanları ve Gelecek Çalışmalar

E-atık tahmin literatürünün diğer alanlara göre genç ve dinamik yapısı vardır. Bu nedenle, bu problem birçok açıdan araştırmaya açık alanlara sahiptir. Bu araştırmaya açık alanlar aynı zamanda problemin sınırlılıklarından da doğmaktadır. E-atık tahmininde en büyük problem kayıtlı e-atık verilerinin istenen düzeyde olmamasıdır. Bu kayıtların sistematik olarak kayıt altına alınması çalışmaları hala sürmektedir. Bu nedenle e-atık veri kayıt sistemlerinin tasarlanmasına yönelik çalışmalara ihtiyaç olduğu net bir şekilde söylenebilir. Benzer şekilde, bu tez

çalışmasının bir sınırlılığı ürün ömürleridir. Tez kapsamında ürün ömürleri varsayıma ve literatüre dayandırılmıştır. Özellikle uygulama çalışmalarında, Türkiye için ürün ömür dağılımlarının tespit edilmesi gerekliliği mevcuttur. Bu konuda literatürde çoğunlukla anketler kullanılmış ve bu alanda boşluklar bulunmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte yapay zekâ ve nesnelerin interneti (IoT) yardımıyla bozulma, kullanımdan çıkma, ikinci el pazarına girme gibi farklı ürün yaşam sonu evrelerine ait veriler toplanabilir. Aynı zamanda e-atık toplama ve taşıma faaliyetleri Türkiye’de henüz ürün bazında yapılamamaktadır. Bu sistemlerin tasarlanması ile verilerin kayıt altına alınması, e-atık oluşumunun tahmin edilmesi için iyi bir veri kaynağı olma potansiyeline sahiptir. Tüm bunlarla birlikte, son yıllarda gerçekleşen salgın, doğal afetler, global ekonomik krizler, malzeme tedarik problemleri gibi faktörlerin e-atık oluşumuna etkisi tahmin modellerine dahil edilebilir. E-atık tahmininde meta sezgisel yöntemlerin, makine öğrenmesi ve yapay zekâ tekniklerinin kullanımı ise gelecek çalışmalara yön verebilecek nitelikte henüz boş alanlardır.

9. KAYNAKLAR

Abbondanza, M. N. M. and Souza, R. G., “Estimating the generation of household e-waste in municipalities using primary data from surveys: A case study of Sao Jose dos Campos, Brazil”, *Waste Management*, 85, 374-384, (2019).

Akputat, O., “Atığın Ötesinde [online]”, <https://rec.org.tr/wp-content/uploads/2020/06/AtiginOtesinde2020.pdf>, (2020a).

Akputat, O., “Değerlendirilebilir Atıkların Yönetimi: Elektronik Atıklar”, *Marmara Belediyeler Birliği, Şehir ve Toplum Dergisi*, 16 (2020b).

Alavi, N., Shirmardi, M., Babaei, A., Takdastan, A. and Bagheri, N., “Waste electrical and electronic equipment (WEEE) estimation: A case study of Ahvaz City, Iran”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65 (3), 298-305, (2015).

Araújo, M. G., Magrini, A., Mahler, C. F. and Bilitewski, B., “A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil”, *Waste Management*, 32 (2), 335-342, (2012).

Aydemir, E., Bedir, F. and Özdemir, G., “Gri Sistem Teorisi Ve Uygulamaları: Bilimsel Yazın Taraması”, *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18 (3), 187-200, (2013).

Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R. and Stegmann, P., *The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows and resources*, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA): Bonn/Geneva/Vienna:2017).

Bass, F. M., “A new product growth for model consumer durables”, *Management science*, 15 (5), 215-227, (1969).

Bilgi Teknolojileri Kurumu, “Information Technology and Communication Agency, Activity Reports (2001-2021), (In Turkish) [online]”, (13.11.2022), <https://www.btk.gov.tr/faaliyet-raporlari>,

Bilgi Teknolojileri Kurumu, “Statistics on Devices with Electronic Identity Information (2007-2015), (In Turkish) [online]”, (13.11.2022), <https://www.btk.gov.tr/elektronik-kimlik-bilgisini-haiz-cihazlara-dair-istatistikler>,

Bilgi Teknolojileri Kurumu, “Information Technology and Communication Agency, Activity Reports [online]”, <https://www.btk.gov.tr/faaliyet-raporlari>, (2001-2021).

Bilgi Teknolojileri Kurumu, “Statistics on Devices with Electronic Identity Information [online]”, <https://www.btk.gov.tr/elektronik-kimlik-bilgisini-haiz-cihazlara-dair-istatistikler>, (2007-2015).

Bilgi Teknolojileri Kurumu, “Information Technologies and Communications Authority, Sectoral Report, Annual Statistical Bulletin on the Electronic Communications Sector by Province, (In Turkish) [online]”, <https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/yillik-il-istatistikleri/elektronik-haberlesme-sektorune-iliskin-il-bazinda-yillik-istatistik-bulteni.pdf>, (2021).

Bogar, Z. O., Capraz, O. and Güngör, A., “An Overview of Methods Used for Estimating E-waste Amount”, *Electronic Waste Management and Treatment Technology*, Elsevier, 53-75, (2019).

Bressanelli, G., Saccani, N., Pigosso, D. C. and Perona, M., “Circular Economy in the WEEE industry: A systematic literature review and a research agenda”, *Sustainable Production and Consumption*, 23, 174-188, (2020).

Chatfield, C., *Time-series forecasting*, Chapman and Hall/CRC, (2000).

Christodoulos, C., Michalakelis, C. and Varoutas, D., “Forecasting with limited data: Combining ARIMA and diffusion models”, *Technological forecasting and social change*, 77 (4), 558-565, (2010).

Chung, S. S., Lau, K. Y. and Zhang, C., “Generation of and control measures for, e-waste in Hong Kong”, *Waste Management*, 31 (3), 544-54, (2011).

Clarke, C., Williams, I. D. and Turner, D. A., “Evaluating the carbon footprint of WEEE management in the UK”, *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 465-473, (2019).

Corona, B., Shen, L., Reike, D., Carreón, J. R. and Worrell, E., “Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics”, *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104498, (2019).

Crowe, M., Elser, A., Gopfert, B., Mertins, L., Meyer, T., Schmid, J., Spillner, A. and Strobel, R., “Waste from electrical and electronic equipment (WEEE)-quantities, dangerous substances and treatment methods [online]”, Copenhagen, Denmark, (2003).

Cucchiella, F., D'Adamo, I., Koh, S. L. and Rosa, P., "Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams", *Renewable and sustainable energy reviews*, 51, 263-272, (2015).

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, "AEEE işleme tesisi sorgulama [online]", (20.04.2023), <https://eizin.cevre.gov.tr/Rapor/BelgeArama.aspx>, (2022a).

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, "Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment Regulations (2022), (In Turkish) [online]", (20.01.2023), <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/yon-32055eee-20230102204403.pdf>, (2022b).

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "Atık Elektrikli Ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği [online]", <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/05/20120522-5.htm>, (2012).

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "T. C. Ministry of Environment and Urbanization Waste Statistics Bulletin (2020), (In Turkish) [online]", (25.01.2023), <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/2020-yili-atik-istat-st-kler--bulten--rev-ze12012023-20230112135036.pdf>, (2020).

Çimen, Ö., "Construction and built environment in circular economy: A comprehensive literature review", *Journal of Cleaner Production*, 305, 127180, (2021).

D'Adamo, I., Rosa, P. and Terzi, S., "Challenges in waste electrical and electronic equipment management: A profitability assessment in three European countries", *Sustainability*, 8 (7), 633, (2016).

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

Duman, G. M., Kongar, E. and Gupta, S. M., "Estimation of electronic waste using optimized multivariate grey models", *Waste Management & Research*, 95, 241-249, (2019).

Duman, G. M., Kongar, E. and Gupta, S. M., "Predictive analysis of electronic waste for reverse logistics operations: a comparison of improved univariate grey models", *Soft Computing*, 24 (20), 15747-15762, (2020).

Dwivedy, M. and Mittal, R. K., "Estimation of future outflows of e-waste in India", *Waste Management*, 30 (3), 483-91, (2010).

Forti, V., Balde, C. P., Kuehr, R. and Bel, G., “The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential [online]”, United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR): Bonn, Germany; International Telecommunication Union (ITU): Geneva, Switzerland; International Solid Waste Association (ISWA): Rotterdam, The Netherlands, (2020).

Forti, V., Baldé, K. and Kuehr, R., “E-waste statistics: guidelines on classifications, reporting and indicators [online]”, United Nations University: Bonn, Germany, (2018).

Gardner, J. and Everette, S., “Exponential smoothing: The state of the art”, *Journal of forecasting*, 4 (1), 1-28, (1985).

Golev, A., Corder, G. D. and Rhamdhani, M. A., “Estimating flows and metal recovery values of waste printed circuit boards in Australian e-waste”, *Minerals Engineering*, 137, 171-176, (2019).

Golev, A., Schmeda-Lopez, D. R., Smart, S. K., Corder, G. D. and McFarland, E. W., “Where next on e-waste in Australia?”, *Waste Management*, 58, 348-358, (2016).

Gonda, L., D’Ans, P. and Degrez, M., “A comparative assessment of WEEE collection in an urban and rural context: Case study on desktop computers in Belgium”, *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 131-142, (2019).

Guo, R. and Zhong, Z., “Assessing WEEE sustainability potential with a hybrid customer-centric forecasting framework”, *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1918-1933, (2021).

Guo, X. and Yan, K., “Estimation of obsolete cellular phones generation: A case study of China”, *Sci Total Environ*, 575, 321-329, (2017).

Gupta, N., Trivedi, A. and Hait, S., “Material composition and associated toxicological impact assessment of mobile phones”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 104603, (2020).

Gusukuma, M. and Kahhat, R., “Electronic waste after a digital TV transition: Material flows and stocks”, *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 142-150, (2018).

He, P., Hu, G., Wang, C., Hewage, K., Sadiq, R. and Feng, H., “Analyzing present and future availability of critical high-tech minerals in waste cellphones: A case study of India”, *Waste Management (New York, Ny)*, 119, 275, (2021).

He, W., Li, G., Ma, X., Wang, H., Huang, J., Xu, M. and Huang, C., “WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China”, *Journal of hazardous materials*, 136 (3), 502-512, (2006).

Heshmati, A., “A Review of the Circular Economy and its Implementation”, *International Journal of Green Economics*, 11 (3-4), 251-288, (2017).

Hyndman, R. J. and Khandakar, Y., “Automatic time series forecasting: the forecast package for R”, *Journal of statistical software*, 27, 1-22, (2008).

Hyndman, R. J., Koehler, A. B., Snyder, R. D. and Grose, S., “A state space framework for automatic forecasting using exponential smoothing methods”, *International Journal of forecasting*, 18 (3), 439-454, (2002).

Ikhlayel, M., “Differences of methods to estimate generation of waste electrical and electronic equipment for developing countries: Jordan as a case study”, *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 134-139, (2016).

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

Islam, M. T. and Huda, N., “E-waste in Australia: Generation estimation and untapped material recovery and revenue potential”, *Journal of Cleaner Production*, 237, 117787, (2019).

Jain, A. and Sareen, R., “E-waste assessment methodology and validation in India”, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 8 (1), 40-45, (2006).

Ju-Long, D., “Control problems of grey systems”, *Systems & control letters*, 1 (5), 288-294, (1982).

Kalkınma Bakanlığı, “T. C. Ministry of Development, 11th Development Plan (In Turkish) [online]”, (2018).

Kalmykova, Y., Patricio, J., Rosado, L. and Berg, P. E., “Out with the old, out with the new--The effect of transitions in TVs and monitors technology on consumption and WEEE generation in Sweden 1996-2014”, *Waste Management*, 46, 511-22, (2015).

Kastanaki, E. and Giannis, A., “Forecasting quantities of critical raw materials in obsolete feature and smart phones in Greece: A path to circular economy”, *Journal of Environmental Management*, 307, 114566, (2022).

Kayacan, E., Ulutas, B. and Kaynak, O., “Grey system theory-based models in time series prediction”, *Expert systems with applications*, 37 (2), 1784-1789, (2010).

Kazancoglu, Y., Ozbiltekin, M., Ozen, Y. D. O. and Sagnak, M., “A proposed sustainable and digital collection and classification center model to manage e-waste in emerging economies”, *Journal of Enterprise Information Management*, 34, 267-291, (2020).

Kececi, B., Dengiz, O., Dengiz, B., Sumer, E., Kilic, A., Ceki, E., Inan, B. and Cicek, S., “WEEE estimation and determination of collection points: A case for the Municipality of Cankaya”, (2018).

Kim, S., Oguchi, M., Yoshida, A. and Terazono, A., “Estimating the amount of WEEE generated in South Korea by using the population balance model”, *Waste Management*, 33 (2), 474-83, (2013).

Kiran, M., Shanmugam, P. V., Mishra, A., Mehendale, A. and Sherin, H. N., “A multivariate discrete grey model for estimating the waste from mobile phones, televisions, and personal computers in India”, *Journal of Cleaner Production*, 293, 126185, (2021).

Kosai, S., Kishita, Y. and Yamasue, E., “Estimation of the metal flow of WEEE in Vietnam considering lifespan transition”, *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104621, (2020).

Koshta, N., Patra, S. and Singh, S. P., “Estimation of E-waste at micro level for reverse logistics: A case of Delhi”, *Journal of Cleaner Production*, 314, 128063, (2021).

Kothari, P. L., Ahluwalia, P. and Nema, A. K., “A grey system approach for forecasting disposable computer waste quantities: a case study of Delhi”, *International Journal of Business Continuity and Risk Management*, 2 (3), 203-218, (2011).

Kumar, P. and Shrihari, S., “Estimation and material flow analysis of waste electrical and electronic equipment (WEEE)–a case study of Mangalore City, Karnataka, India”, *Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Chennai, India*, 5-7, (2007).

Li, A., Li, B., Lu, B., Yang, D., Hou, S. and Song, X., “Generation estimation and material flow analysis of retired mobile phones in China”, *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 75626–7563, (2022).

Li, B., Yang, J., Lu, B. and Song, X., “Estimation of retired mobile phones generation in China: A comparative study on methodology”, *Waste Management*, 35, 247-254, (2015).

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

Li, J., Song, X., Yang, D., Li, B. and Lu, B., “Simulating the interprovincial movements of waste mobile phones in China based on the current disassembly capacity”, *Journal of Cleaner Production*, 244, 118776, (2020).

Lohse, J., Winteler, S. and Wulf-Schnabel, J., “Collection targets for waste from electrical and electronic equipment (WEEE) the directorate general (DG XI) environment”, *Nuclear safety and civil protection of the Commission of the European Communities*, (1998).

Magalini, F., Wang, F., Huisman, J., Kuehr, R., Baldé, K., van Straalen, V., Hestin, M., Lecerf, L., Sayman, U. and Akpulat, O., “Study on collection rates of waste electrical and electronic equipment (WEEE)”, *European Commission*, (2014).

Mao, S., Kang, Y., Zhang, Y., Xiao, X. and Zhu, H., “Fractional grey model based on non-singular exponential kernel and its application in the prediction of electronic waste precious metal content”, *ISA Transactions*, 107, 12-26, (2020).

Murthy, V. and Ramakrishna, S., “A review on global E-waste management: urban mining towards a sustainable future and circular economy”, *Sustainability*, 14 (2), 647, (2022).

Nathani, C. and Arnsberg, W., “Materialfluß spezifischer Abfallarten und Abfallkennziffern bedeutender Bereiche–Endbericht Teil I”, *Herausgegeben von Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe*, (1998).

Oguchi, M., Kameya, T., Yagi, S. and Urano, K., “Product flow analysis of various consumer durables in Japan”, *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (3), 463-480, (2008).

Ongondo, F. O., Williams, I. D. and Cherrett, T. J., “How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes”, *Waste management*, 31 (4), 714-730, (2011).

Owusu-Sekyere, K., Batteiger, A., Afoblikame, R., Hafner, G. and Kranert, M., “Assessing data in the informal e-waste sector: The Agbogbloshie Scrapyard”, *Waste Management*, 139, 158-167, (2022).

Ozsut Bogar, Z. and Gungor, A., “Forecasting Waste Mobile Phone (WMP) Quantity and Evaluating the Potential Contribution to the Circular Economy: A Case Study of Turkey”, *Sustainability*, 15 (4), 3104, (2023).

Öztürk, T., “Generation and management of electrical–electronic waste (e-waste) in Turkey”, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17 (3), 411-421, (2014).

Pan, X., Wong, C. W. and Li, C., “Circular economy practices in the waste electrical and electronic equipment (WEEE) industry: A systematic review and future research agendas”, *Journal of Cleaner Production*, 132671, (2022).

Pant, D., “E-waste projection using life-span and population statistics”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18 (8), 1465-1469, (2013).

Pegels, C. C., “Exponential forecasting: Some new variations”, *Management Science*, 15 (5), 311-315, (1969).

Peralta, G. L. and Fontanos, P. M., “E-waste issues and measures in the Philippines”, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 8 (1), 34-39, (2006).

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

Petridis, N. E., Stiakakis, E., Petridis, K. and Dey, P., “Estimation of computer waste quantities using forecasting techniques”, *Journal of Cleaner Production*, 112, 3072-3085, (2016).

Polak, M. and Drapalova, L., “Estimation of end of life mobile phones generation: the case study of the Czech Republic”, *Waste Management*, 32 (8), 1583-91, (2012).

Price, M., “Daily Metal Price, Metal Spot Prices by Date [online]”, (01.04.2022), <https://www.dailymetalprice.com/metaltables.php?d=2022-04-0>, (2022).

Rahmani, M., Nabizadeh, R., Yaghmaeian, K., Mahvi, A. H. and Yunesian, M., “Estimation of waste from computers and mobile phones in Iran”, *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 21-29, (2014).

Rao, R., “Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7 (1), 19-34, (2016).

Ravindra, K. and Mor, S., “E-waste generation and management practices in Chandigarh, India and economic evaluation for sustainable recycling”, *Journal of Cleaner Production*, 221, 286-294, (2019).

Reike, D., Vermeulen, W. J. and Witjes, S., “The circular economy: new or refurbished as CE 3.0?—exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options”, *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 246-264, (2018).

Resmi Gazete, “Regulation Amending the Regulation on Registration of Devices Carrying Electronic Identity Information, (In Turkish) [online]”, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/02/20210220-16.htm>, (2021).

Resmi Gazete, “Waste Electrical and Electronic Equipment Control Regulation (2022), (In Turkish) [online]”, (20.01.2023), <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/12/20221226-1.htm>, (2022).

Robinson, B. H., “E-waste: an assessment of global production and environmental impacts”, *Sci Total Environ*, 408 (2), 183-91, (2009).

Ryan-Fogarty, Y., Coughlan, D. and Fitzpatrick, C., “Quantifying WEEE arising in scrap metal collections: Method development and application in Ireland”, *Journal of Industrial Ecology*, 25 (4), 1021-1033, (2021).

Sahan, M., Kucuker, M. A., Demirel, B., Kuchta, K. and Hursthouse, A., “Determination of Metal Content of Waste Mobile Phones and Estimation of Their Recovery Potential in Turkey”, *Int J Environ Res Public Health*, 16 (5), 887, (2019).

Sajid, M., Syed, J. H., Iqbal, M., Abbas, Z., Hussain, I. and Baig, M. A., “Assessing the generation, recycling and disposal practices of electronic/electrical-waste (E-Waste) from major cities in Pakistan”, *Waste Management*, 84, 394-401, (2019).

Sakthivel, U., Swaminathan, G. and Anis, J., “Strategies for Quantifying Metal Recovery from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE/E-waste) Using

Mathematical Approach”, *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 1-10, (2022).

Salihoğlu, G. and Kahraman, A. E., “Electrical and Electronical Waste Generation in Turkey: Bursa Case Study”, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21 (2), 95-106, (2016).

Sanayi ve Teknoloji bakanlığı, “Ankara İli Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya Geri Dönüşüm Tesisi Ön Fizibilite Raporu [online]”, https://www.yatirimadestek.gov.tr/pdf/assets/upload/fizibiliteler/ankara_ili_aeee_geri_donusum_on_fizibilite_raporu_2021.pdf, (2021).

Sepúlveda, A., Schluep, M., Renaud, F. G., Streicher, M., Kuehr, R., Hagelúken, C. and Gerecke, A. C., “A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipments during recycling: Examples from China and India”, *Environmental impact assessment review*, 30 (1), 28-41, (2010).

Shevchenko, T., Saidani, M., Ranjbari, M., Kronenberg, J., Danko, Y. and Laitala, K., “Consumer behavior in the circular economy: Developing a product-centric framework”, *Journal of Cleaner Production*, 384, 135568, (2023).

Shittu, O. S., Williams, I. D. and Shaw, P. J., “Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges”, *Waste Management*, 120, 549-563, (2021).

Singh, N., Duan, H., Ogunseitan, O. A., Li, J. and Tang, Y., “Toxicity trends in E-Waste: A comparative analysis of metals in discarded mobile phones”, *Journal of Hazardous Materials*, 380, 120898, (2019).

Singh, N., Duan, H., Yin, F., Song, Q. and Li, J., “Characterizing the materials composition and recovery potential from waste mobile phones: A comparative evaluation of cellular and smart phones”, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6 (10), 13016-13024, (2018).

Sohal, A. and De Vass, T., “Australian SME's experience in transitioning to circular economy”, *Journal of Business Research*, 142, 594-604, (2022).

Stahel, W. R., “The circular economy”, *Nature*, 531 (7595), 435-438, (2016).

Steubing, B., Boni, H., Schluep, M., Silva, U. and Ludwig, C., “Assessing computer waste generation in Chile using material flow analysis”, *Waste Management*, 30 (3), 473-82, (2010).

Streicher-Porte, M., Widmer, R., Jain, A., Bader, H.-P., Scheidegger, R. and Kytzia, S., “Key drivers of the e-waste recycling system: Assessing and modelling e-waste processing in the informal sector in Delhi”, *Environmental impact assessment review*, 25 (5), 472-491, (2005).

Tasaki, T., Takasuga, T., Osako, M. and Sakai, S., “Substance flow analysis of brominated flame retardants and related compounds in waste TV sets in Japan”, *Waste Management*, 24 (6), 571-80, (2004).

Taylor, J. W., “Exponential smoothing with a damped multiplicative trend”, *International journal of Forecasting*, 19 (4), 715-725, (2003).

Thiébaud-Müller, E., Hilty, L. M., Schluep, M., Widmer, R. and Faulstich, M., “Service Lifetime, Storage Time, and Disposal Pathways of Electronic Equipment: A Swiss Case Study”, *Journal of Industrial Ecology*, 22 (1), 196-208, (2018).

Thiebaud, E., Hilty, L. M., Schluep, M. and Faulstich, M., “Use, Storage, and Disposal of Electronic Equipment in Switzerland”, *Environ Sci Technol*, 51 (8), 4494-4502, (2017).

Tran, H. P., Schaubroeck, T., Nguyen, D. Q., Ha, V. H., Huynh, T. H. and Dewulf, J., “Material flow analysis for management of waste TVs from households in urban areas of Vietnam”, *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 78-89, (2018).

UNEP, “E-waste Volume I: Inventory Assessment Manual United Nations Environmental Programme Division of Technology, Industry and Economic [online]”, Osaka/Shiga, (2007).

Walk, W., “Forecasting quantities of disused household CRT appliances--a regional case study approach and its application to Baden-Wurtemberg”, *Waste Management*, 29 (2), 945-51, (2009).

Wang, F., Huisman, J., Stevels, A. and Balde, C. P., “Enhancing e-waste estimates: improving data quality by multivariate Input-Output Analysis”, *Waste Management*, 33 (11), 2397-407, (2013).

Wang, F., Yu, L. and Wu, A., “Forecasting the electronic waste quantity with a decomposition-ensemble approach”, *Waste Management*, 120, 828-838, (2021).

Wang, M., You, X., Li, X. and Liu, G., “Watch more, waste more? A stock-driven dynamic material flow analysis of metals and plastics in TV sets in China”, *Journal of Cleaner Production*, 187, 730-739, (2018).

Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M. and Böni, H., “Global perspectives on e-waste”, *Environmental impact assessment review*, 25 (5), 436-458, (2005).

Xie, N. and Liu, S., “Discrete GM (1, 1) and mechanism of grey forecasting model”, *Systems Engineering-theory & Practice*, 1, 93-99, (2005).

Yang, Y. and Williams, E., “Logistic model-based forecast of sales and generation of obsolete computers in the U.S”, *Technological Forecasting and Social Change*, 76 (8), 1105-1114, (2009).

Yasar, H. and Kilimci, Z. H., “US Dollar/Turkish lira exchange rate forecasting model based on deep learning Methodologies and Time Series Analysis”, *Symmetry*, 12 (9), 1553, (2020).

Yazici, B., Can, Z. S. and Calli, B., “Prediction of future disposal of end-of-life refrigerators containing CFC-11”, *Waste Management*, 34 (1), 162-6, (2014).

Zeng, X., Ali, S. H. and Li, J., “Estimation of waste outflows for multiple product types in China from 2010–2050”, *Scientific Data*, 8 (1)(2021).

Zhang, S., Ding, Y., Liu, B. and Chang, C.-c., “Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE”, *Waste Management*, 65, 113-127, (2017).

Zhang, S., Gu, Y., Tang, A., Li, B., Li, B., Pan, D. and Wu, Y., “Forecast of future yield for printed circuit board resin waste generated from major household electrical and electronic equipment in China”, *Journal of Cleaner Production*, 283, 124575, (2021).

Zhao, M., Zhao, C., Yu, L., Li, G., Huang, J., Zhu, H. and He, W., “Prediction and Analysis of WEEE in China Based on the Gray Model”, *Procedia Environmental Sciences*, 31, 925-934, (2016).

EKLER

10. EKLER

EK-A

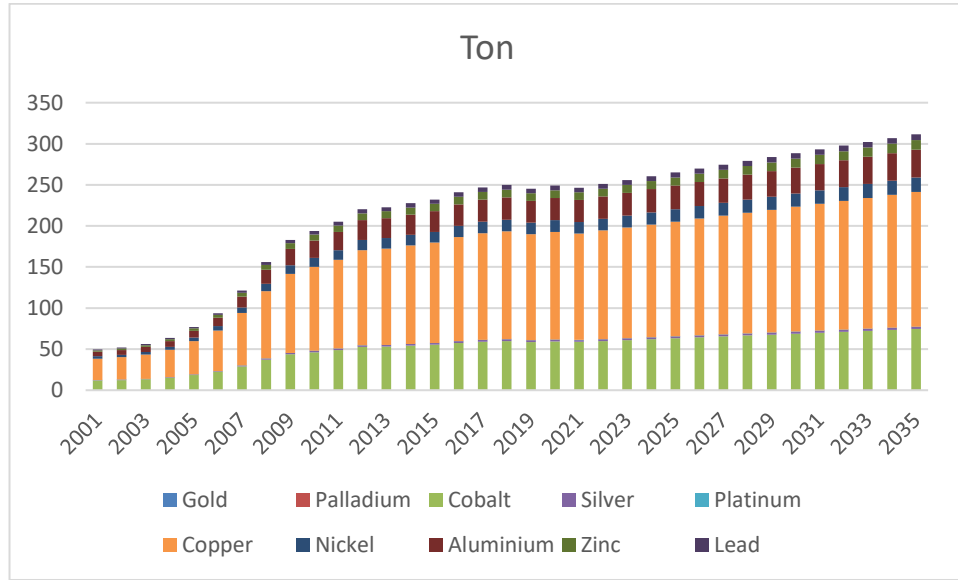
Tablo A.1: Satış (piyasaya sürülen ürün) verileri (adet)

Yıl	İthalat	İhracat	Üretim	Yolcu beraberi	Net satış
1994	175.000				175.000
1995	300.000				300.000
1996	425.000				425.000
1997	900.000				900.000
1998	2.200.000				2.200.000
1999	6.300.000				6.300.000
2000	7.631.990	218.512			7.413.478
2001	2.436.000	518.544			1.917.456
2002	4.044.800	258.205			3.786.595
2003	5.238.512	49.847			5.188.665
2004	7.547.091	11.906			7.535.185
2005	9.005.560	34.605			8.970.955
2006	13.143.061	29.023		158.128	13.272.166
2007	15.811.936	76.356		670.084	16.405.664
2008	14.522.515	154.519		807.365	15.175.361
2009	10.990.347	91.482		566.614	11.465.479
2010	12.145.459	185.223	453.336	828.491	13.242.063
2011	14.308.793	130.339	87.408	1.098.784	15.364.646
2012	10.627.991	148.343	192.781	1.119.952	11.792.381
2013	12.199.623	195.195	347.649	1.031.136	13.383.213
2014	12.546.529	421.298	896.608	610.044	13.631.883
2015	13.581.718	518.544	1.526.326	723.532	15.313.032
2016	13.464.546	873.757	1.281.320	773.940	14.646.049
2017	12.189.655	579.393	1.600.655	842.932	14.053.849
2018	9.820.192	504.022	1.717.902	878.089	11.912.161
2019	14.124.114	188.000	653.095	323.052	14.912.261
2020	9.733.229	69.464	795.983	72.417	10.532.165

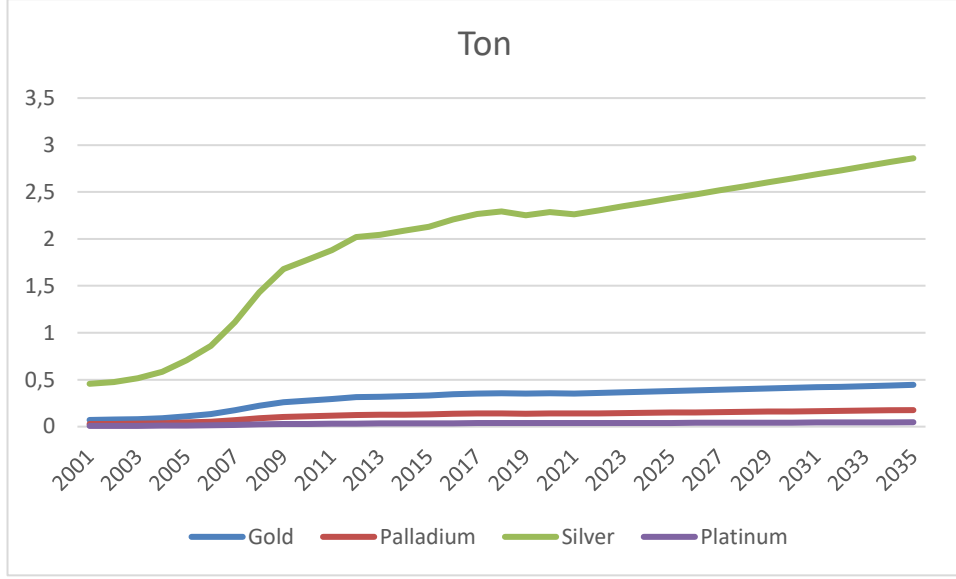
*Veriler Kalkınma Bakanlığı (2018), Bilgi Teknolojileri Kurumu (2007-2015) ve Bilgi Teknolojileri Kurumu (2001-2021) kaynaklarından derlenmiştir.

Tablo A.2: Yöntemlere ait modelleme hata değerleri (-1 yıl ürün ömrü)

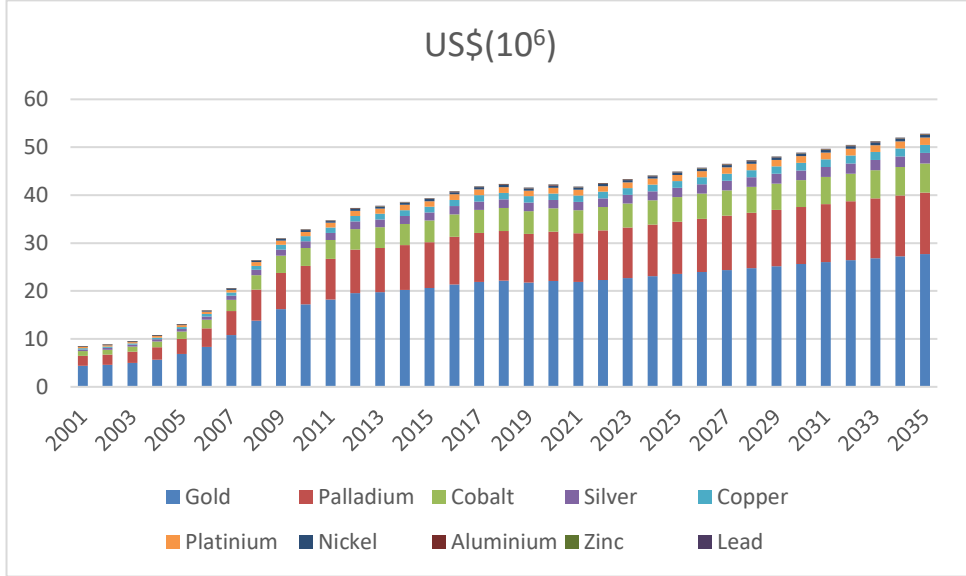
Yöntem/Hata	MAPE (%)	RMSE ($\times 10^6$)	SSE ($\times 10^{12}$)
SES	9.1412	0.4685	4.3906
Holt's Yöntemi	2.3356	0.1483	0.4401
Lojistik	4.8206	0.1671	0.5583
Gompertz	7.5383	0.2476	1.2261
Logaritmik	30.6882	1.0197	20.7977
Bass	8.3655	0.3858	2.9771
ARIMA	6.4430	0.2334	1.0896



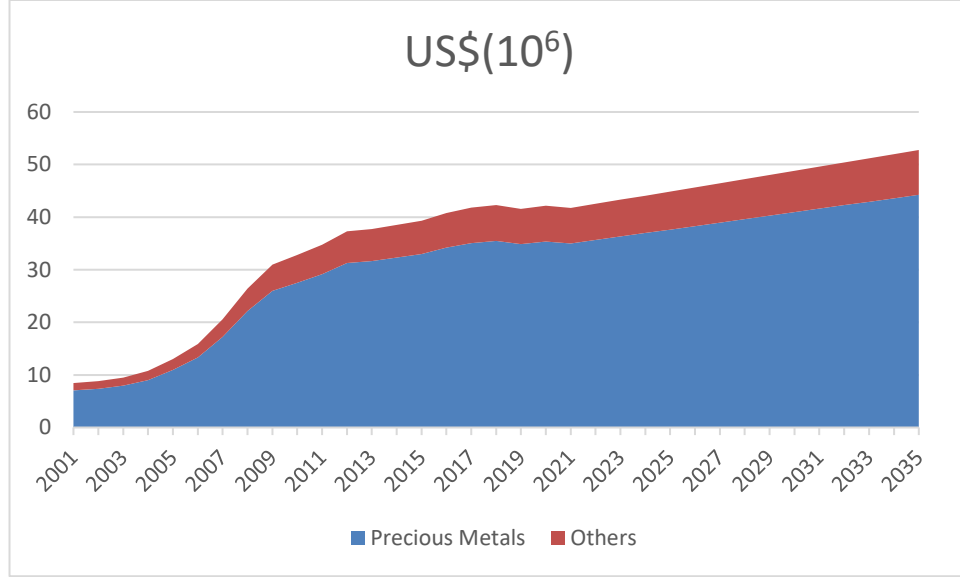
Şekil A.1: Ton cinsinden atık malzeme miktarları (-1 yıl ürün ömrü)



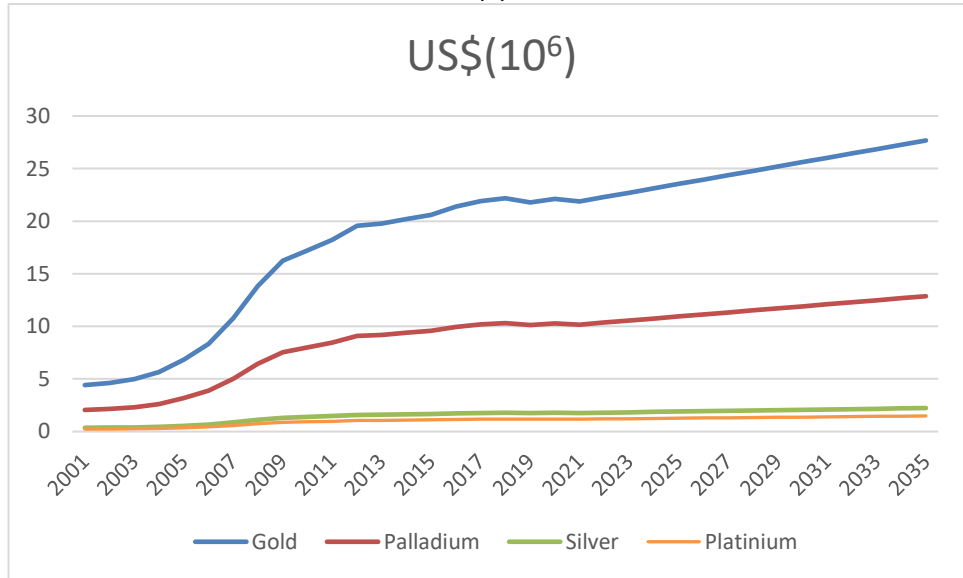
Şekil A.2: Ton cinsinden kıymetli malzeme miktarları (- 1 yıl ürün ömrü)



Şekil A.3: Atık malzemelerin getiri potansiyelleri US\$ (10⁶) (-1 yıl ürün ömrü)



(a)

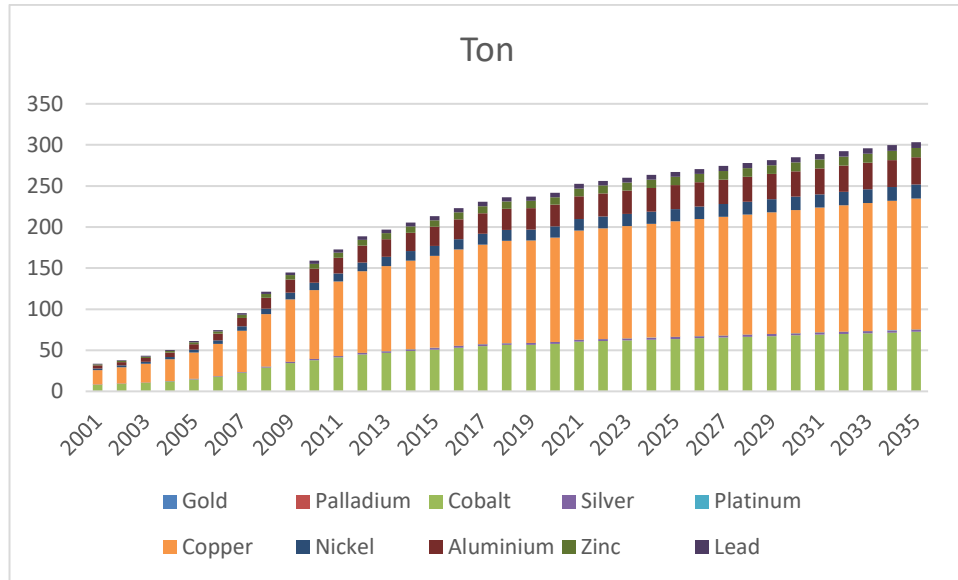


(b)

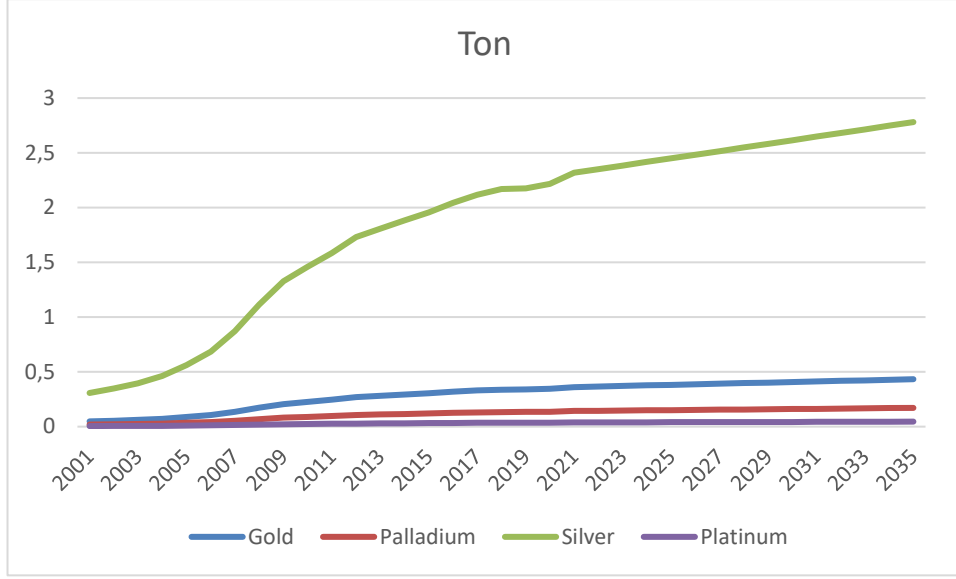
Şekil A.4: (a) Kıymetli ve diğer malzemeler için toplam getiri potansiyeli; (b) değerli malzemeler için getiri potansiyeli US\$ (-1 yıl ürün ömrü)

Tablo A.3: Yöntemlere ait modelleme hata değerleri (+1 yıl ürün ömrü)

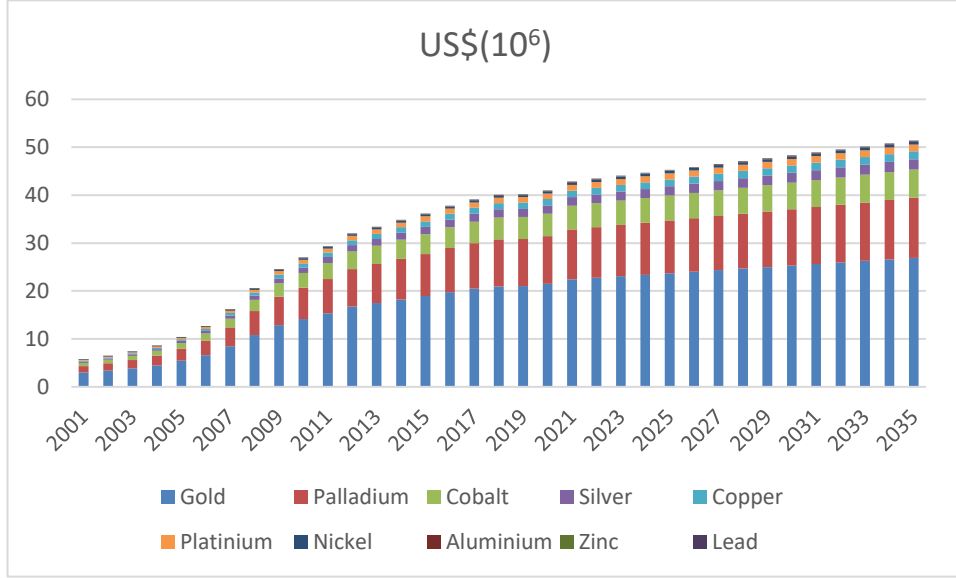
Yöntem/Hata	MAPE (%)	RMSE ($\times 10^6$)	SSE ($\times 10^{12}$)
SES	7.6022	0.5249	5.5107
Holt's Yöntemi	3.2192	0.2475	1.2256
Lojistik	6.7715	0.2976	1.7712
Gompertz	9.1378	0.4092	3.3483
Logaritmik	22.9551	0.9961	19.8435
Bass	8.7778	0.5252	5.5167
ARIMA	10.9283	0.5336	5.6942



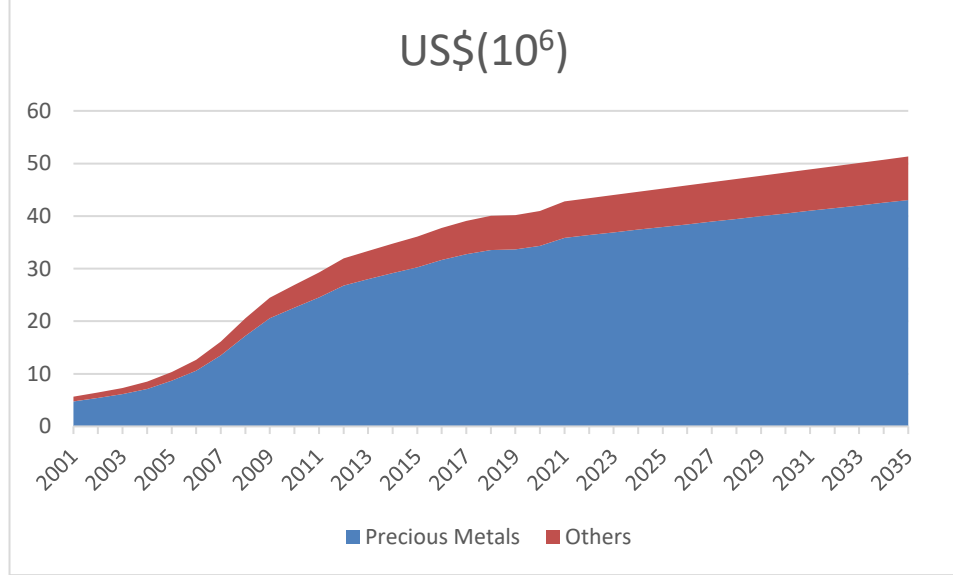
Şekil A.5: Ton cinsinden atık malzeme miktarları (+1 yıl ürün ömrü)



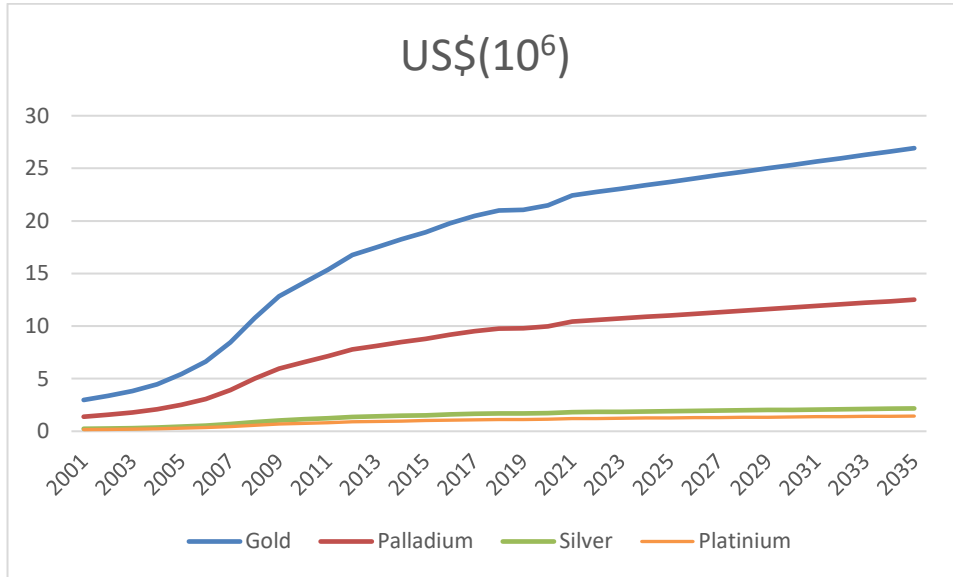
Şekil A.6: Ton cinsinden kıymetli malzeme miktarları (+1 yıl ürün ömrü)



Şekil A.7: Atık malzemelerin getiri potansiyelleri US\$ (10⁶) (+1 yıl ürün ömrü)



(a)



(b)

Şekil A.8: (a) Kıymetli ve diğer malzemeler için toplam getiri potansiyeli; (b) değerli malzemeler için getiri potansiyeli US\$ (+1 yıl ürün ömrü)

Tablo A.4: Birim ACT’de bulunan malzemelerin ağırlık katsayıları (Singh ve diğ. 2019; Singh ve diğ. 2018)

Element	Hücrese telefon	Akıllı telefon
Ag	1	1.208
Al	1	1.117
Au	1	1.024
Co	1	0.934
Cu	1	0.945
Ni	1	2.158
Pb	1	3.977
Pd	1	1.087
Pt	1	1.000
Zn	1	1.199

Tablo A.5: Cep telefonu (CP) ve akıllı telefonların (SP) yıllara göre abone oranı ve üretilen atık malzeme miktarları (ton)

Yıl	2G abone oranı	3G+4.5G abone oranı	Toplam atık oranı (CP)	Toplam atık oranı (SP)	Pb		Zn		Al		Ni		Cu	
					CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP
2001	100	0	100	0	0.92	0.00	1.53	0.00	4.44	0.00	2.27	0.00	21.43	0.00
2002	100	0	100	0	1.01	0.00	1.68	0.00	4.87	0.00	2.49	0.00	23.49	0.00
2003	100	0	100	0	1.12	0.00	1.87	0.00	5.42	0.00	2.78	0.00	26.19	0.00
2004	100	0	100	0	1.29	0.00	2.15	0.00	6.23	0.00	3.19	0.00	30.08	0.00
2005	100	0	100	0	1.56	0.00	2.61	0.00	7.56	0.00	3.87	0.00	36.48	0.00
2006	100	0	100	0	1.90	0.00	3.17	0.00	9.20	0.00	4.71	0.00	44.40	0.00
2007	100	0	100	0	2.44	0.00	4.07	0.00	11.79	0.00	6.04	0.00	56.93	0.00
2008	100	0	100	0	3.12	0.00	5.20	0.00	15.07	0.00	7.72	0.00	72.77	0.00
2009	100	0	100	0	3.70	0.00	6.16	0.00	17.86	0.00	9.15	0.00	86.22	0.00
2010	68.57	31.43	67.32	32.68	1.42	2.58	4.30	2.36	12.79	6.55	4.98	4.93	65.15	28.21
2011	51.97	48.03	50.87	49.13	0.92	3.38	3.40	3.77	10.23	10.56	3.56	7.09	53.58	46.79
2012	38.24	61.76	37.40	62.60	0.63	4.03	2.65	5.12	8.03	14.49	2.57	8.96	43.04	65.68
2013	29.28	70.72	28.64	71.36	0.45	4.35	2.05	5.95	6.27	16.92	1.91	9.97	34.12	77.87
2014	18.86	81.14	18.46	81.54	0.27	4.68	1.34	6.92	4.13	19.83	1.19	11.08	22.84	92.83
2015	12.74	87.26	12.48	87.52	0.18	4.92	0.92	7.58	2.85	21.81	0.80	11.83	15.93	103.11
2016	5.97	94.03	5.85	94.15	0.08	5.23	0.45	8.40	1.38	24.28	0.38	12.77	7.80	116.08
2017	3.97	96.03	3.90	96.10	0.06	5.41	0.30	8.81	0.94	25.49	0.25	13.28	5.35	122.25
2018	2.66	97.34	2.60	97.40	0.04	5.53	0.21	9.08	0.64	26.28	0.17	13.62	3.65	126.33
2019	2.24	97.76	2.20	97.80	0.03	5.51	0.17	9.06	0.54	26.22	0.14	13.56	3.06	126.14
2020	2.36	97.64	2.31	97.69	0.03	5.59	0.19	9.19	0.58	26.22	0.15	13.77	3.27	128.03

Tablo A.5 (devam): Cep telefonu (CP) ve akıllı telefonların (SP) yıllara göre abone oranı ve üretilen atık malzeme miktarları (ton)

Yıl	2G abone oranı	3G+4.5G abone oranı	Toplam atık oranı (CP)	Toplam atık oranı (SP)	Pt		Ag		Co		Pd		Au	
					CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP
2001	100	0	100	0	0.01	0.00	0.37	0.00	9.64	0.00	0.02	0.00	0.06	0.00
2002	100	0	100	0	0.01	0.00	0.41	0.00	10.57	0.00	0.03	0.00	0.06	0.00
2003	100	0	100	0	0.01	0.00	0.46	0.00	11.78	0.00	0.03	0.00	0.07	0.00
2004	100	0	100	0	0.01	0.00	0.52	0.00	13.53	0.00	0.03	0.00	0.08	0.00
2005	100	0	100	0	0.01	0.00	0.64	0.00	16.42	0.00	0.04	0.00	0.10	0.00
2006	100	0	100	0	0.01	0.00	0.77	0.00	19.98	0.00	0.05	0.00	0.12	0.00
2007	100	0	100	0	0.02	0.00	0.99	0.00	25.62	0.00	0.06	0.00	0.15	0.00
2008	100	0	100	0	0.02	0.00	1.27	0.00	32.75	0.00	0.08	0.00	0.20	0.00
2009	100	0	100	0	0.02	0.00	1.50	0.00	38.80	0.00	0.09	0.00	0.23	0.00
2010	68.57	31.43	67.32	32.68	0.02	0.01	1.05	0.58	29.42	12.60	0.07	0.03	0.17	0.08
2011	51.97	48.03	50.87	49.13	0.01	0.02	0.83	0.92	24.24	20.93	0.05	0.05	0.14	0.13
2012	38.24	61.76	37.40	62.60	0.01	0.02	0.64	1.25	19.50	29.42	0.04	0.07	0.11	0.18
2013	29.28	70.72	28.64	71.36	0.01	0.02	0.50	1.45	15.47	34.92	0.03	0.09	0.09	0.22
2014	18.86	81.14	18.46	81.54	0.01	0.03	0.33	1.69	10.37	41.68	0.02	0.10	0.06	0.26
2015	12.74	87.26	12.48	87.52	0.00	0.03	0.22	1.85	7.24	46.33	0.02	0.11	0.04	0.28
2016	5.97	94.03	5.85	94.15	0.00	0.03	0.11	2.05	3.55	52.20	0.01	0.13	0.02	0.32
2017	3.97	96.03	3.90	96.10	0.00	0.04	0.07	2.15	2.44	54.99	0.01	0.13	0.01	0.33
2018	2.66	97.34	2.60	97.40	0.00	0.04	0.05	2.22	1.66	56.83	0.00	0.14	0.01	0.34
2019	2.24	97.76	2.20	97.80	0.00	0.04	0.04	2.21	1.39	56.75	0.00	0.14	0.01	0.34
2020	2.36	97.64	2.31	97.69	0.00	0.04	0.04	2.24	1.49	57.60	0.00	0.14	0.01	0.35

Tablo A.6: Klasik ayrık gri modeller ve matematiksel ifadeleri

Gri Model	Denklem
DGM(1,1)	$x^{(1)}(k+1) = \beta_1 x^{(1)}(k) + \beta_2$
NDGM(1,1)	$x^{(1)}(k+1) = \beta_1 x^{(1)}(k) + \beta_2 k + \beta_3$
TDGM(1,1)	$x^{(1)}(k+1) = (\beta_1 + \beta_2 k)x^{(1)}(k) + \beta_3 k + \beta_4$
QDGM(1,1)	$x^{(1)}(k+1) = (\beta_1 + \beta_2 k + \beta_3 k^2)x^{(1)}(k) + \beta_4 k^2 + \beta_5 k + \beta_6$
CDGM(1,1)	$x^{(1)}(k+1) = (\beta_1 + \beta_2 k + \beta_3 k^2 + \beta_4 k^3)x^{(1)}(k) + \beta_5 k^3 + \beta_6 k^2 + \beta_7 k + \beta_8$
TBDGM(1,1)*	$x^{(1)}(k) = \beta_1 x^{(1)}(k-1) + \beta_2 + \beta_3 \sin(\omega_1 k) + \beta_4 \cos(\omega_2 k)$

*Çalışma kapsamında önerilen ayrık gri model