



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELEKTRONİK ATIKLARDAN DEĞERLİ METAL GERİ KAZANIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Vildan ÜNAL UZEL

DANIŞMAN

Prof. Dr. Melayib BİLGİN

AKSARAY, 2025

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 212301016 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Vildan ÜNAL UZEL tarafından hazırlanan “**ELEKTRONİK ATIKLARDAN DEĞERLİ METAL GERİ KAZANIMI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Melayib BİLGİN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Prof. Dr. Mustafa KARATAŞ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Dr. Şennur Merve YAKUT

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 23/01/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

Vildan ÜNAL UZEL

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında emeği geçen tüm kişi ve kurumlara teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Öncelikle, çalışmamın gerçekleşmesinde destek sağlayan, tezimin imalat aşamasında önemli katkıları olan Uzel Proje Mühendislik Müşavirlik Ticaret Limited Şirketi'ne içtenlikle teşekkür ederim. Şirketin sağladığı teknik destek ve gerekli altyapıyı sunması, araştırmamı başarılı bir şekilde gerçekleştirmeme olanak tanıdı. Çalışma sürecindeki iş birliğiniz ve her aşamadaki yardımsever tutumunuz benim için büyük bir değer taşıyor.

Bu çalışmanın akademik yönlendirilmesinde büyük emeği olan değerli danışmanım Prof. Dr. Melayib BİLGİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Hocam, bilgi birikiminiz ve tecrübenizle bana her aşamada yol gösterdiniz, sabrınız ve özverinizle bu süreci anlamlı ve verimli kıldınız. Araştırma boyunca bana verdiğiniz destek, önerileriniz ve yapıcı eleştirileriniz bu çalışmanın ortaya çıkmasında en büyük etkenlerden biri oldu.

Ayrıca, akademik yolculuğum boyunca bana her zaman rehberlik eden ve cesaretlendiren sevgili aileme de teşekkürü borç bilirim. Özellikle bu süreçteki anlayışları, motivasyonları ve sabırları sayesinde çalışmalarımı sorunsuz bir şekilde sürdürebildim.

Son olarak, bu çalışmanın tüm zorluklarına rağmen bana ilham veren tüm meslektaşlarıma ve değerli hocalarıma da teşekkür ederim.

Bu tez, her biri farklı açılardan bu sürece katkı sağlayan bireylerin ortak emeğiyle şekillenmiştir. Hepinize şükranlarımı sunuyorum.

Vildan ÜNAL UZEL

AKSARAY, 2025

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1 GİRİŞ	1
1.1 Atıkların Artışı ve İçerdikleri Metallerin Endüstrideki Önemi	1
1.2 Elektronik Atıkların Artışı.....	2
1.3 İçerdikleri Metallerin Endüstrideki Önemi	2
1.4 Geri Dönüşüm Teknolojileri ve Süreçleri	3
1.4.1 Geri dönüşüm süreçleri.....	3
1.5 Geri Dönüşüm Teknolojilerinin Etkinliği	4
1.6 Geri Dönüşümün Çevresel ve Ekonomik Faydaları.....	5
1.6.1 Çevresel faydalar	5
1.6.2 Ekonomik faydalar.....	6
1.7 Çevresel Etkilerin Analizi	7
1.8 Ekonomik Faydaların Değerlendirilmesi	8
1.9 Geri Dönüşüm Süreçlerinin İyileştirilmesi.....	10
2 KAYNAK ÖZETLERİ	12
2.1 Elektronik Atıkların Tanımı ve Türleri	13
2.2 Elektronik Atıkların İçinde Bulunan Değerli Metallerin Önemi ve Kullanım Alanları.....	14
2.3 Geri Dönüşüm Teknolojileri ve Süreçleri	16
2.4 Önceki Çalışmaların Bulguları ve Önerileri.....	17
3 YÖNTEM.....	20
3.1 Literatür Taraması ve Veri Toplama Yöntemleri.....	20
3.1.1 Literatür taraması.....	20
3.1.2 Veri toplama yöntemleri.....	21
3.2 Elektronik Atık İşleme Tesislerinin ve Geri Dönüşüm Teknolojilerinin İncelenmesi.....	22
3.2.1 Tesisin amacı	22
3.2.2 Tesisin yapısı ve bölümleri.....	22
3.2.2.1 Toplama ve depolama alanı	22
3.2.2.2 Ön işleme ve demontaj bölümü	22
3.2.2.3 Parçalama (shredding) ve mekanik ayırma.....	23
3.2.2.4 Kimyasal ve termal işleme.....	23
3.2.2.5 Bertaraf ve geri kazanım	23
3.2.3 Tesis kapasitesi ve teknolojik imkanlar.....	23
3.2.4 Çevresel ve ekonomik katkılar	24
3.3 Mekanik Geri Dönüşüm Tesisleri	24
3.4 Parçalama (Shredding) ve Öğütme Tesisleri.....	24
3.5 Ayırma ve Sınıflandırma Tesisleri	25
3.6 Kimyasal Geri Dönüşüm Tesisleri	25
3.6.1 Asitleme (leaching) tesisleri	25
3.6.2 Elektroliz tesisleri	25

3.7 Termal Geri Dönüşüm Tesisleri	25
3.7.1 Pirometalurji tesisleri	26
3.7.2 Termal indirgeme tesisleri	26
3.8 Biyolojik Geri Dönüşüm Tesisleri	26
3.9 Biyometalurji Tesisleri	26
3.10 Entegre Geri Dönüşüm Tesisleri	26
3.10.1 Çok aşamalı tesisler ..	26
3.11 Elektronik Atık İşleme Tesislerinin Kapasitesi ve Çalışma Prensipleri.....	27
3.11.1 Mekanik geri dönüşüm tesisleri	27
3.11.1.1 Parçalama ve öğütme kapasitesi	27
3.11.1.2 Ayırma ve sınıflandırma prensipleri	27
3.11.2 Kimyasal geri dönüşüm tesisleri.....	27
3.11.2.1 Asitleme kapasitesi	28
3.11.2.2 Elektroliz prensipleri.....	28
3.11.3 Termal geri dönüşüm tesisleri.....	28
3.11.3.1 Pirometalurji kapasitesi.....	28
3.11.3.2 Termal indirgeme prensipleri.....	28
3.11.4 Biyolojik geri dönüşüm tesisleri	29
3.11.4.1 Biyometalurji kapasitesi	29
3.11.4.2 Biyolojik ayırma prensipleri	29
3.11.5 Entegre geri dönüşüm tesisleri.....	29
3.11.5.1 Çok aşamalı tesis kapasitesi	29
3.12 Farklı Bölgelerdeki Elektronik Atık İşleme Tesislerinin Karşılaştırılması ...	30
3.12.1 Avrupa birliği (AB) tesisleri	30
3.12.1.1 Teknoloji ve süreçler.....	30
3.12.1.2 Çevresel düzenlemeler	30
3.12.2 Amerika Birleşik Devletleri (ABD) tesisleri	31
3.12.2.1 Teknoloji ve süreçler.....	31
3.12.2.2 Çevresel düzenlemeler	31
3.12.3 Çin tesisleri	31
3.12.3.1 Teknoloji ve süreçler.....	31
3.12.3.2 Çevresel düzenlemeler	32
3.12.4 Hindistan tesisleri	32
3.12.4.1 Teknoloji ve süreçler.....	32
3.12.4.2 Çevresel düzenlemeler	32
3.12.5 Gelişmekte olan ülkelerdeki tesisler	32
3.12.5.1 Teknoloji ve süreçler.....	33
3.12.5.2 Çevresel düzenlemeler	33
3.12.6 Elektronik atık alım ve sınıflandırma süreçleri.....	33
3.13 Atık Alım Yöntemleri.....	33
3.13.1 Belediye ve özel toplama sistemleri	33
3.13.2 Üretici sorumluluğu	34
3.13.3 İnfomal sektör	34
3.13.4 Sınıflandırma süreçleri.....	34
3.13.4.1 Manuel ayırma	34
3.13.4.2 Otomatik ayırma	34
3.14 Verimli Sınıflandırma için Teknolojik Gelişmeler.....	35
3.15 Bölgesel Farklılıklar	35
3.15.1 Elektronik atıkların toplanması ve sınıflandırılması süreçleri	36
3.15.1.1 Elektronik atık toplama yöntemleri.....	36

3.15.1.2 Sınıflandırma süreçleri.....	37
3.16 Gelişmiş Teknolojiler ve Bölgesel Farklılıklar	37
3.16.1 Elektronik atık akışı ve ayrıştırma teknikleri.....	38
3.16.2 Atık akışı.....	38
3.16.2.1 Toplama ve taşıma	38
3.16.2.2 İlk ayıklama.....	38
3.16.2.3 Öğütme ve parçalama.....	38
3.16.3 Ayrıştırma teknikleri.....	39
3.16.3.1 Manyetik ayırma	39
3.16.3.2 Eddy current (foucault akımı) ayırma.....	39
3.16.3.3 Elektrostatik ayırma	39
3.16.3.4 Optik ayırma	39
3.16.3.5 Hava akımı ile ayırma	39
3.16.3.6 Pirometalurji (Yüksek sıcaklıkta ayırma)	40
3.16.3.7 Kimyasal leaching (Asitleme).....	40
3.16.4 Bölgesel farklılıklar ve uygulamalar.....	40
3.17 Otomatik ve Manuel Sınıflandırma Sistemleri.....	40
3.17.1 Otomatik sınıflandırma sistemleri	41
3.17.1.1 Manyetik ayırma	41
3.17.1.2 Eddy current (foucault akımı) ayırma.....	41
3.17.1.3 Optik ayırma	41
3.17.1.4 Elektrostatik ayırma	41
3.17.1.5 Hava akımı ile ayırma	42
3.17.1.6 Robotik ayırıcılar	42
3.17.2 Manuel sınıflandırma sistemleri	42
3.17.2.1 Elle ayrıştırma	42
3.17.2.2 Tehlikeli malzemelerin çıkarılması.....	42
3.17.2.3 Düşük teknoloji kullanımı.....	43
3.17.2.4 Esneklik.....	43
3.18 Otomatik ve Manuel Sınıflandırma Sistemlerinin Karşılaştırılması	43
3.19 Değersiz Malzeme Ayıklama Süreçleri.....	44
3.19.1 Değersiz malzeme türleri	45
3.19.1.1 Değersiz malzeme ayıklamanın önemi	45
3.19.1.2 Plastik, cam ve diğer değersiz malzemelerin ayıklanması.....	46
3.19.1.3 Cam malzemelerin ayıklanması	47
3.19.1.4 Diğer değersiz malzemelerin ayıklanması	47
3.19.1.5 Değersiz malzemelerin bertarafı	48
3.19.1.6 Geri dönüşüme uygun olmayan malzemelerin bertarafı	50
3.20 Düzenli Depolama (Landfill)	51
3.21 Yeniden Kullanım ve İyileştirme	51
3.22 Eğitim ve Farkındalık	51
3.22.1 Değerli metal geri kazanımı.....	52
3.22.1.1 Değerli metal içeren bileşenlerin ayrıştırılması	52
3.22.2 Kimyasal geri kazanım süreçleri.....	53
3.22.3 Termal geri kazanım süreçleri	55
3.22.4 Plastik ve cam geri kazanımı	56
3.22.4.1 Plastik geri kazanımı.....	56
3.22.4.2 Cam geri kazanımı	57
3.23 Elektronik Atıkların İçinde Bulunan Toksik Maddelerin Kontrolü ve Bertarafı	58

3.23.1 Toksik maddelerin tanımlanması ve izlenmesi.....	58
3.24 Değerli Metal Geri Kazanımı için Kullanılan Yöntemlerin Analizi	69
3.24.1 Fiziksel ayırma yöntemleri	69
3.24.1.1 Gömülü metal çıkarma.....	69
3.24.1.2 Optik ayırma	70
3.24.1.3 Yoğunluk ayırma.....	70
3.24.2 Kimyasal ayırma yöntemleri.....	70
3.24.2.1 Asit ayırma	70
3.24.2.2 Sıvı sıvı ekstraksiyonu	70
3.24.2.3 Çöktürme (precipitation).....	70
3.24.3 Elektrokimyasal yöntemler	70
3.24.3.1 Elektroliz	70
3.24.3.2 Elektrokimyasal çözünme	71
3.24.4 Termal yöntemler.....	71
3.24.4.1 Pirometalurji.....	71
3.24.4.2 Kızgın tuz elektrolizi.....	71
3.24.5 Biyolojik yöntemler	71
3.24.5.1 Bakteriyel liç	71
3.24.5.2 Fotosentez	71
3.24.6 Hibrit yöntemler.....	71
3.24.6.1 Birleşik fiziksel-kimyasal yöntemler	71
3.24.6.2 Birleşik elektrokimyasal-termal yöntemler.....	71
3.24.7 İnovatif yöntemler.....	72
3.24.7.1 Ultrasonik ayırma.....	72
3.24.7.2 Plazma ark yakma	72
4 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	73
4.1 Elektronik Atıkların İçinde Bulunan Değerli Metallerin Miktarı ve Bileşimi	73
4.1.1 Altın (AU).....	73
4.1.2 Gümüş (AG)	73
4.1.3 Bakır (CU)	73
4.1.4 Paladyum (PD).....	74
4.1.5 Platin (PT).....	74
4.1.6 Diğer değerli metaller.....	74
4.2 Geri Dönüşüm Teknolojilerinin Etkinliği ve Verimliliği	74
4.2.1 Malzeme ayrıştırma ve sınıflandırma	75
4.2.2 İşlem teknolojisi ve ekipmanlar	75
4.2.3 Kimyasal ve fiziksel işlemler.....	75
4.2.4 Atık akışı ve konsantrasyonu	75
4.2.5 Çevresel ve enerji performansı	75
4.2.6 Ekonomik faktörler	75
4.2.7 Yönetim ve operasyonel pratikler.....	76
4.3 Çevresel Etkiler ve Sürdürülebilirlik.....	76
4.3.1 Kaynakların korunması.....	76
4.3.2 Enerji tasarrufu	76
4.3.3 Atık miktarının azaltılması	77
4.3.4 Zehirli maddelerin kontrolü	77
4.3.5 Hava ve su kirliliğinin azaltılması	77
4.3.6 İklim değişikliğinin azaltılması	77
4.3.7 Yerel ekonomilere katkı.....	77
4.3.8 Döngüsel ekonomiye geçiş	77

4.4 Ekonomik Analiz: Maliyet-Fayda Analizi ve Değerli Metal Fiyatlarının Etkisi	78
4.4.1 Maliyet-fayda analizi	78
4.4.2 Değerli metal fiyatlarının etkisi	79
4.5 Türkiye’de Elektronik Atık Geri Dönüşümünün Mevcut Durumu	79
4.5.1 Türkiye’de faaliyet gösteren elektronik atık geri dönüşüm tesisleri.....	79
4.5.2 Elektronik atık geri dönüşümünün mevcut durumu	80
4.5.3 Türkiye’deki lisanslı elektronik atık geri dönüşüm tesisleri.....	80
4.5.4 Türkiye’de elektronik atık geri dönüşüm süreçleri.....	80
4.5.5 Elektronik atık geri dönüşümünün önemi ve gelecek perspektifi.....	81
4.5.6 İşleyiş süreçleri ve kapasiteleri	81
4.5.7 Kapasiteler ve tesislerin işleme gücü.....	83
4.5.8 Örnek tesislerin kapasiteleri.....	83
4.5.9 Karşılaşılan sorunlar ve fırsatlar	83
4.5.9.1 Karşılaşılan sorunlar	84
4.5.9.2 Fırsatlar	85
4.5.10 Türkiye’deki elektronik atık geri dönüşüm tesisleri ve örnek uygulamalar	86
4.5.10.1 Türkiye’deki önde gelen elektronik atık geri dönüşüm tesisleri....	86
4.5.10.2 İş akış süreçleri.....	87
5 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	90
KAYNAKLAR.....	96
ÖZGEÇMİŞ.....	104

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK ATIKLARDAN DEĞERLİ METAL GERİ KAZANIMI

Vildan ÜNAL UZEL

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Melayib BİLGİN

ÖZET

Bu tez, elektronik atıkların (e-atık) içerdiği değerli metallerin geri kazanımı ve bu sürecin çevresel ve ekonomik etkilerini ele almaktadır. Teknolojik gelişmeler ve tüketici elektroniği kullanımının artmasıyla birlikte elektronik atık miktarı hızla artmakta, bu da doğal kaynaklar ve çevre üzerinde baskı yaratmaktadır. E-atıklar, altın, gümüş, platin, bakır ve paladyum gibi değerli metaller içerir ve bu metallerin geri kazanımı hem çevre koruma hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından büyük bir fırsat sunmaktadır. Tezde, elektronik atıkların geri dönüştürülmesiyle madencilik faaliyetlerine olan talebin azalabileceği, enerji tasarrufu sağlanabileceği ve doğal kaynakların korunabileceği vurgulanmaktadır. Ayrıca, geri kazanılan metallerin ekonomik değeri sayesinde geri dönüşüm endüstrisinin büyüme potansiyeli ele alınmaktadır. Bu süreçler hem çevresel ayak izini azaltmakta hem de değerli kaynakların yeniden ekonomiye kazandırılmasını sağlamaktadır. Çalışma, geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi, atık toplama sistemlerinin iyileştirilmesi ve halkın bu konuda bilinçlendirilmesi gibi öneriler sunarak, geri kazanım süreçlerinin daha verimli hale getirilmesini önermektedir. Sonuç olarak, elektronik atıkların etkin bir şekilde yönetilmesi ve geri dönüşümün teşvik edilmesi hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik kazanç açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektronik Atık (e-atık), Değerli Metal Geri Kazanımı, Geri Dönüşüm, Çevresel Sürdürülebilirlik, Ekonomik Sürdürülebilirlik, Doğal Kaynaklar, Enerji Tasarrufu, Geri Dönüşüm Teknolojileri.

Mart, 2025; 104 sayfa

M.Sc. THESIS

RECOVERY OF VALUABLE METALS FROM ELECTRONIC WASTE

Vildan ÜNAL UZEL

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Melayib BİLGİN

ABSTRACT

This thesis examines the recovery process of valuable metals contained in electronic waste (e-waste) and the environmental and economic impacts of this process. With the advancement of technology and the increasing use of consumer electronics, the volume of electronic waste is rapidly rising, placing significant pressure on natural resources and the environment. E-waste contains valuable metals such as gold, silver, platinum, copper, and palladium, and recovering these metals presents a substantial opportunity for both environmental protection and economic sustainability. The thesis emphasizes that the recycling of electronic waste can reduce the demand for traditional mining activities, conserve energy, and help preserve natural resources. Additionally, the economic value of recovered metals contributes to the growth potential of the recycling industry, providing economic benefits. These processes are crucial for reducing the environmental footprint and reintroducing valuable resources into the economy. The study proposes strategies for improving recycling technologies, enhancing waste collection systems, and raising public awareness about electronic waste, thereby suggesting ways to make recovery processes more efficient. In conclusion, effective management of electronic waste and the promotion of recycling play a critical role in both environmental sustainability and economic gain.

Keywords: Electronic Waste (e-waste), Valuable Metal Recovery, Recycling, Environmental Sustainability, Economic Sustainability, Natural Resources, Energy Conservation, Recycling Technologies.

March, 2025; 104 pages

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Otomatik ve Manuel Sınıflandırma Sistemleri	43
--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR

Ag	Gümüş
Au	Altın
Cu	Bakır
E-atık	Elektronik Atık
Pd	Paladyum
Pt	Platin



1 GİRİŞ

Elektronik atıklar, günümüzde hızla artan bir sorun haline gelmiş olup, teknolojik gelişmeler ve değişen tüketim alışkanlıkları ile birlikte dünya genelinde büyük miktarlarda birikmektedir. Mobil telefonlar, bilgisayarlar, televizyonlar ve diğer elektronik cihazların sürekli olarak yenilenmesi, bu atıkların artışı tetiklemekte ve geri dönüşüm süreçlerinin önemini artırmaktadır. Elektronik atıkların içeriğinde bulunan değerli metaller, endüstride kritik bir rol oynamaktadır. Altın, gümüş, bakır gibi metaller, bu atıklardan geri kazanılarak yeni ürünlerin üretiminde kullanılabilir ve doğal kaynakların korunmasına yardımcı olabilir (Liu vd., 2019; Zeng vd., 2018).

Bu tez, elektronik atıkların geri dönüşüm sürecinde değerli metallerin kazanımını, çevresel etkilerini ve ekonomik faydalarını incelemeyi hedeflemektedir. Geri dönüşüm, doğal kaynakların korunması, atık miktarının azaltılması, enerji tasarrufu sağlanması ve sera gazı emisyonlarının azaltılması gibi çevresel faydalar sunarken; istihdam olanakları, maliyet tasarrufu ve yeşil ekonomi gibi ekonomik avantajlar da sunmaktadır (Babu vd., 2007; Wang vd., 2013).

Ayrıca, elektronik atıkların geri dönüşüm sürecinin etkinliğini artırmak için mevcut teknolojilerin analizi ve iyileştirilmesi için öneriler sunulacaktır. Böylece, elektronik atıkların geri dönüşümünün sürdürülebilirlik açısından önemi ve potansiyeli vurgulanacaktır. Bu bağlamda, araştırmanın bulguları, çevresel ve ekonomik boyutlarıyla birlikte, elektronik atıkların yönetimi ve geri dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesine ışık tutacaktır.

1.1 Atıkların Artışı ve İçerdikleri Metallerin Endüstrideki Önemi

Günümüzde teknolojik gelişmelerin hızlanması ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi, elektronik atıkların (e-atıklar) artışı beraberinde getirmiştir. Elektronik cihazların sürekli olarak yenilenmesi ve kısa ömürlü kullanım süreleri, büyük miktarlarda atık birikmesine neden olmaktadır. Dünya genelinde her yıl milyonlarca ton elektronik atık ortaya çıkmakta, bu da çevresel sorunları ve kaynak israfını artırmaktadır (Kumar ve Holuszko, 2016).

Elektronik atıklar, hızla artan teknolojik gelişmeler ve tüketim alışkanlıklarıyla birlikte günümüzde büyük bir sorun haline gelmiştir. Mobil telefonlar, bilgisayarlar, televizyonlar, beyaz eşyalar ve diğer elektronik cihazlar gibi ürünlerin kullanım ömürlerinin kısalması, atık miktarlarını artırmaktadır (Baldé vd., 2017).

1.2 Elektronik Atıkların Artışı

Günümüzde kullanıcılar, teknolojinin hızlı gelişimi nedeniyle sık sık yeni cihazlar satın almakta ve eski cihazlarını daha çabuk değiştirmektedir. Özellikle akıllı telefonlar ve dizüstü bilgisayarlar, hızla gelişen teknolojik özellikler nedeniyle kısa sürede modası geçmektedir (Ghosh vd., 2015). Hızlı teknolojik değişim, elektronik cihazların hızla eskimesine ve atıl hale gelmesine neden olur. Yeni ve daha gelişmiş cihazlar piyasaya sürüldükçe, eski cihazların kullanımı azalır (Golev ve Smart, 2016). Birçok elektronik cihazın kullanım ömrü kısa olabilir. Özellikle mobil telefonlar gibi cihazlar, yeni özelliklerin piyasaya sürülmesiyle hızla eskiyebilir (Agamuthu ve Hamid, 2012).

1.3 İçerdikleri Metallerin Endüstrideki Önemi

Elektronik atıkların içeriğinde birçok değerli metal bulunmaktadır. Bu metaller, çeşitli endüstriyel süreçlerde kullanılmakta ve önemli ekonomik değer taşımaktadır. Elektronik atıkların içinde bulunan metaller, endüstriyel üretim için son derece önemlidir ve çeşitli endüstrilerde kullanılırlar (Baldé vd., 2017). Aşağıda, elektronik atıkların içindeki başlıca değerli metaller ve bunların endüstrideki önemi açıklanmaktadır;

a.Altın (Au): Elektronik devrelerde ve bağlantı noktalarında sıkça kullanılır. Altın, elektrik iletkenliği ve oksidasyona karşı direnci nedeniyle tercih edilir (Duan vd., 2017).

b.Gümüş (Ag): Yüksek iletkenlik özelliği nedeniyle, elektronik bileşenlerin ve kontak noktalarının yapımında önemlidir. Gümüş, elektronik endüstrisinde değerli bir madde olarak kabul edilir (Kumar ve Holuszko, 2016).

c.Bakır (Cu): Elektronik kablolar, devre kartları ve diğer bileşenlerin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Bakır, mükemmel iletkenlik özelliği nedeniyle elektrik ve elektronik endüstrisinde kritik bir metaldir (Yoo ve Kwak, 2009).

d.Kurşun (Pb): Eski tip lehimlerde kullanılan kurşun, elektronik atıkların geri dönüşümünde çıkarılan bir metaldir. Ancak çevresel zararları nedeniyle kullanımı azalmıştır (Musson ve Townsend, 2010).

e.Çinko (Zn): Pil ve bataryaların içinde bulunan çinko, elektronik atıkların önemli bir bileşenidir (Golev vd., 2014).

f.Paladyum (Pd): Elektronik bileşenlerin üretiminde kullanılan nadir ve değerli bir metaldir. Özellikle platin ve altın gibi metallerin yerine geçen paladyum, elektronik atıkların geri kazanımında önemlidir (Kaya ve Rendón, 2017).

Elektronik atıkların içindeki bu metaller, endüstrideki süreçlerin devamlılığı için kritik öneme sahiptir. Bu metallerin geri kazanılması, hem ekonomik olarak değerli kaynakların yeniden kullanımını sağlar hem de çevresel olarak atık miktarını azaltır (Kumar ve Holuszko, 2017). Bu nedenle, elektronik atıkların geri dönüşümü ve içerdikleri metallerin kazanılması, modern endüstrinin sürdürülebilirliği için önemli bir adımdır (Kuehr ve Wang, 2017).

1.4 Geri Dönüşüm Teknolojileri ve Süreçleri

Elektronik atıkların geri dönüşüm süreçleri, bu atıkların içindeki değerli metallerin ve diğer malzemelerin etkili bir şekilde geri kazanılmasını sağlamak amacıyla çeşitli teknolojiler ve yöntemler kullanarak gerçekleştirilir. Geri dönüşüm teknolojileri, elektronik atıkların ayrıştırılması, işlenmesi ve geri kazanılması aşamalarını kapsar. Bu süreçlerin etkinliği hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik faydalar açısından kritik öneme sahiptir (Babu vd., 2007).

1.4.1 Geri dönüşüm süreçleri

a.Toplama ve Taşıma: Geri dönüşüm sürecinin ilk adımı, elektronik atıkların toplanmasıdır. Bu aşama, atıkların toplanması için uygun sistemlerin ve altyapıların

kurulmasını gerektirir. Atıklar, evlerden, iş yerlerinden ve özel toplama noktalarından toplanır ve geri dönüşüm tesislerine taşınır (Kumar ve Holuszko, 2016).

b.Ayırma ve Sınıflandırma: Toplanan elektronik atıklar, çeşitli bileşenlere ve malzemelere göre ayrıştırılır. Bu aşama, manuel veya otomatik sistemler kullanılarak yapılabilir. Cihazlar, metaller, plastikler ve diğer bileşenler birbirinden ayrılır. Bu işlem, geri kazanılacak materyallerin türüne bağlı olarak, özellikle değerli metallerin geri kazanımını kolaylaştırır (Zeng vd., 2018).

c.İşleme: Ayrıştırılan malzemeler, geri dönüşüm sürecinin bir sonraki aşamasına geçer. İşleme, farklı teknikler ve yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir.

Mekanik yöntemler, elektronik bileşenlerin fiziksel olarak parçalanması ve ayrıştırılması için kullanılır. Bu süreç, genellikle ezme, kırma ve sınıflandırma gibi işlemleri içerir (Liu vd., 2019).

Kimyasal yöntemler, değerli metallerin ayrıştırılmasında kullanılır. Örneğin, asidik çözeltilerle değerli metallerin çözünbileceği süreçler geliştirilmiştir. Bu teknik, genellikle altın, gümüş ve bakır gibi metallerin geri kazanımında etkilidir (Wang vd., 2013).

d.Termal İşleme: Bu süreçte, atıkların yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması yoluyla metal ve diğer malzemelerin ayrıştırılması sağlanır. Termal işleme, özellikle metal geri kazanımında etkili olabilir (Zhang vd., 2020).

e.Geri Kazanım: İşlenen malzemeler, geri kazanım aşamasına geçer. Bu aşamada, ayrıştırılan değerli metaller ve diğer malzemeler, yeni ürünlerin üretiminde kullanılmak üzere yeniden işlenir. Örneğin, bakır, gümüş ve altın, geri dönüşüm tesislerinde yeniden işlenerek çeşitli endüstrilerde kullanılabilir hale gelir (Baldé vd., 2015).

1.5 Geri Dönüşüm Teknolojilerinin Etkinliği

Geri dönüşüm süreçlerinin etkinliği, çevresel etkiler, maliyetler ve geri kazanılan malzemelerin kalitesi açısından değerlendirilmelidir. İyi bir geri dönüşüm süreci hem atık miktarını azaltmalı hem de doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunmalıdır.

Ayrıca, gelişmiş geri dönüşüm teknolojileri, daha yüksek geri kazanım oranları ve daha az çevresel etki sağlayabilir (Kumar ve Holuszko, 2016).

Elektronik atıkların geri dönüşüm süreçleri, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik faydalar açısından büyük öneme sahiptir. Geri dönüşüm teknolojileri, elektronik atıkların içindeki değerli metallerin ve diğer bileşenlerin geri kazanılmasını sağlayarak, doğal kaynakların korunmasına yardımcı olmaktadır. Bu süreçlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, daha sürdürülebilir bir gelecek için kritik bir adımdır (Zeng vd., 2018).

1.6 Geri Dönüşümün Çevresel ve Ekonomik Faydaları

Geri dönüşüm, çevresel ve ekonomik açıdan bir dizi fayda sağlayan önemli bir süreçtir. Elektronik atıkların geri dönüşümü özellikle çevre ve ekonomi üzerinde olumlu etkiler yaratır (Kumar ve Holuszko, 2017).

1.6.1 Çevresel faydalar

a.Doğal Kaynakların Korunması: Geri dönüşüm, doğal kaynakların tükenmesini azaltır. Değerli metallerin geri kazanılması, yeni metal cevherlerinin çıkarılmasını ve işlenmesini azaltır, bu da doğal kaynakların korunmasına yardımcı olur (Baldé vd., 2017).

b.Atık Miktarının Azalması: Elektronik atıkların geri dönüşümü, çöplüklerdeki atık miktarını azaltır. Bu da çevreye yönelik olumsuz etkilerin azalmasına ve atık depolama alanlarının daha az kullanılmasına katkı sağlar (Duan vd., 2017).

c.Toksik Maddelerin Azaltılması: Elektronik atıklar içinde bazı zararlı maddeler bulunabilir, örneğin cıva, kurşun ve kadmiyum gibi. Geri dönüşüm, bu toksik maddelerin kontrol altına alınmasına ve çevreye yayılmasının önlenmesine yardımcı olur (Kuehr ve Wang, 2017).

d.Enerji Tasarrufu: Değerli metallerin geri dönüşümü, yeni metal üretimine göre daha az enerji gerektirir. Bu da enerji kaynaklarının korunmasına ve sera gazı emisyonlarının azalmasına katkı sağlar (Yoo ve Kwak, 2009).

e.İklim Değişikliğinin Etkilerinin Azaltılması: Geri dönüşüm, sera gazı emisyonlarının azalmasına yardımcı olur. Yeni metallerin çıkarılması, işlenmesi ve taşınması süreçlerinde oluşan sera gazı emisyonları, geri dönüşümle azaltılabilir (Musson ve Townsend, 2010).

1.6.2 Ekonomik faydalar

a.Değerli Kaynakların Kazanılması: Elektronik atıkların geri dönüşümü, içinde bulunan değerli metallerin yeniden kazanılmasını sağlar. Altın, gümüş, bakır gibi metaller geri kazanılarak ekonomiye kazandırılır (Li vd., 2007).

b.İstihdam Olanakları: Geri dönüşüm endüstrisi, birçok iş ve istihdam olanağı sağlar. Geri dönüşüm tesislerinde çalışanlar, atıkların toplanması, ayrıştırılması ve işlenmesi gibi birçok farklı alanda iş imkânı bulabilirler (Agamuthu ve Hamid, 2012).

c.Maliyet Tasarrufu: Yeni metal üretimine göre, geri dönüşüm genellikle daha ekonomiktir. Değerli metallerin geri kazanılması, hammadde maliyetini azaltır ve işletmelerin üretim maliyetlerini düşürür (Kaya ve Rendón, 2017).

d.Yeşil Ekonomiye Geçiş: Geri dönüşüm, sürdürülebilir bir ekonomiye geçişin bir parçasıdır. Atıkların yeniden kullanılması ve kaynakların verimli bir şekilde kullanılması, ekonominin yeşil ve sürdürülebilir olmasını sağlar (Baldé vd., 2017).

e.Pazar Fırsatları: Geri dönüşüm endüstrisi, geri dönüştürülmüş ürünlere yönelik yeni pazarlar oluşturur. Geri dönüştürülmüş malzemeler, çeşitli endüstrilerde kullanılarak yeni ürünlerin üretilmesine olanak sağlar (Golev ve Smart, 2016).

Geri dönüşüm, çevresel ve ekonomik faydalarıyla modern toplumların sürdürülebilirlik çabalarının önemli bir parçasıdır. Elektronik atıkların geri dönüşümü, bu faydaları hem çevre hem de ekonomi açısından büyük ölçüde artırır (Kuehr ve Wang, 2017).

Elektronik atıklarda bulunan değerli metaller hem ekonomik hem de çevresel açıdan kritik öneme sahiptir. Bu metallerin geri kazanılması, sürdürülebilir bir endüstriyel uygulama için gereklidir ve atık yönetimi politikalarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

1.7 Çevresel Etkilerin Analizi

Elektronik atıkların (e-atık) çevresel etkileri, bu atıkların doğru şekilde yönetilmemesi durumunda ortaya çıkan çeşitli sorunlarla yakından ilişkilidir. Hızla artan e-atık miktarı hem toprak hem de su kaynakları üzerinde önemli olumsuz etkiler yaratabilir. Bu bölümde, elektronik atıkların çevresel etkileri, toksik maddelerin yayılması, doğal kaynakların tükenmesi ve sera gazı emisyonları açısından incelenecektir.

a.Toksik Maddelerin Yayılması: Elektronik atıklar, civa, kurşun, kadmium, bromlu alev geciktiriciler ve diğer zararlı kimyasallar gibi toksik maddeler içermektedir. Bu maddelerin çevreye yayılması şu şekillerde etkili olabilir:

Elektronik atıklar, genellikle düzgün bir şekilde imha edilmediğinde toprakta birikir. Bu toksik maddeler, toprakta bulunan mikroorganizmaları olumsuz etkileyebilir ve ekosistem dengesini bozabilir (Widmer vd., 2005).

Elektronik atıkların depolama alanlarında veya uygun olmayan koşullarda bertaraf edilmesi, yeraltı su kaynaklarına toksik maddelerin sızmasına neden olabilir. Bu durum, su kaynaklarını kirleterek hem insan sağlığını hem de ekosistemleri tehdit eder (Baldé vd., 2015).

b.Doğal Kaynakların Tükenmesi: Elektronik atıkların geri dönüşümü, doğal kaynakların korunmasında önemli bir rol oynar. Ancak, geri dönüşüm yapılmadığında doğal kaynaklar üzerinde aşağıdaki olumsuz etkiler görülebilir:

Yeni metal cevherlerinin çıkarılması, büyük miktarda doğal kaynak tüketimi gerektirir. E-atıkların geri dönüşümü, bu cevherlerin çıkarılması ihtiyacını azaltarak doğal kaynakların tükenmesini önler (Cui ve Zhang, 2008).

Yeni metallerin üretilmesi, enerji yoğun süreçler gerektirir. Elektronik atıkların geri dönüşümü, bu enerji tüketimini azaltarak çevresel etkileri en aza indirir (Hagelüken, 2006).

c.Sera Gazı Emisyonları: Elektronik atıkların yönetimi, sera gazı emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Elektronik atıkların geri dönüşümünün sağlanmadığı durumlarda ortaya çıkan emisyonlar yeni metallerin üretimi, yüksek enerji tüketimi ile

ilişkilidir ve bu süreçler, sera gazı emisyonlarına yol açar. Elektronik atıkların geri dönüşümü, bu emisyonların azaltılmasına yardımcı olabilir (Kumar ve Bhattacharya, 2017).

Elektronik atıkların depolama alanlarına atılması veya yakılması, sera gazlarının yayılmasına neden olabilir. Bu durum, iklim değişikliğini hızlandırabilir ve çevresel sorunları artırabilir (Zeng ve Li, 2016).

Elektronik atıkların çevresel etkileri hem doğal kaynakların tükenmesi hem de insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkiler açısından önemlidir. E-atıkların uygun bir şekilde geri dönüştürülmesi, bu sorunların çözümünde kritik bir adım olarak öne çıkmaktadır. Toksik maddelerin yayılmasının kontrol altına alınması, doğal kaynakların korunması ve sera gazı emisyonlarının azaltılması için etkili geri dönüşüm yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir.

1.8 Ekonomik Faydaların Değerlendirilmesi

Elektronik atıkların geri dönüşümü, yalnızca çevresel faydalar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik açıdan da önemli avantajlar sunar. Bu bölümde, elektronik atıkların geri dönüşümünün ekonomik faydaları, değerli kaynakların kazanılması, istihdam olanakları, maliyet tasarrufu, yeşil ekonomi ve pazar fırsatları bağlamında incelenecektir.

Elektronik atıklar, altın, gümüş, bakır, paladyum ve diğer değerli metaller gibi önemli kaynaklar içermektedir. Geri dönüşüm sayesinde bu metallerin yeniden kazanılması, şu avantajları sağlar:

a.Ekonomik Değer: Geri kazanılan metaller, yeni metal üretimine göre daha düşük maliyetlerle ekonomiye kazandırılır. Bu durum, hammadde maliyetlerini azaltır ve işletmelerin rekabet gücünü artırır (Kumar ve Bhattacharya, 2017).

b.Kaynak Verimliliği: Elektronik atıkların geri dönüşümü, yeni metal cevherlerinin çıkarılması ihtiyacını azaltarak doğal kaynakların daha verimli kullanılmasına olanak tanır (Cui ve Zhang, 2008).

Geri dönüşüm endüstrisi, birçok iş fırsatı yaratmaktadır. Bu süreç, farklı iş alanlarında çalışanlar için yeni istihdam olanakları sağlar:

a. Atık Toplama ve Ayırıştırma: Geri dönüşüm tesisleri, atıkların toplanması ve ayrıştırılması için iş gücü gerektirir. Bu alanda çalışacak personel, istihdam olanaklarına sahip olur (Baldé vd., 2015).

b. Teknik ve Mühendislik Roller: Geri dönüşüm süreçlerinde mühendislik, tasarım ve teknik uzmanlık gerektiren birçok pozisyon bulunmaktadır. Bu, yüksek nitelikli iş gücüne yönelik bir talep yaratır (Widmer vd., 2005).

Geri dönüşüm, birçok açıdan maliyet tasarrufu sağlar:

a. Üretim Maliyetleri: Yeni metal üretimi, enerji ve hammadde maliyetleri açısından yüksektir. Geri dönüşüm, bu maliyetleri azaltarak işletmelerin üretim giderlerini düşürür (Hagelüken, 2006).

b. Atık Yönetimi Maliyetleri: Elektronik atıkların geri dönüştürülmesi, atık yönetimi süreçlerini daha verimli hale getirir. Bu, çöp alanlarının kullanımını azaltarak uzun vadede tasarruf sağlar (Zeng ve Li, 2016).

Geri dönüşüm, sürdürülebilir bir ekonomi için önemli bir adımdır:

a. Sürdürülebilirlik: Atıkların geri dönüşümü, doğal kaynakların daha verimli kullanılmasına ve çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olur. Bu, yeşil ekonomiye geçişin temel unsurlarından biridir (Kumar ve Bhattacharya, 2017).

b. Döngüsel Ekonomi: Geri dönüşüm, döngüsel ekonominin bir parçası olarak, kaynakların sürekli olarak geri kazanılması ve yeniden kullanılması anlamına gelir. Bu yaklaşım, ekonomik büyümenin sürdürülebilir olmasını sağlar (Baldé vd., 2015).

Geri dönüşüm endüstrisi, yeni pazar fırsatları yaratmaktadır:

a. Geri Dönüştürülmüş Ürünler: Geri dönüştürülen malzemeler, çeşitli endüstrilerde kullanılmakta ve yeni ürünlerin üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu, yenilikçi ürünlerin pazara sunulmasını sağlar (Zeng ve Li, 2016).

b.Yeşil Ürün Talebi: Tüketicilerin çevre dostu ürünlere yönelik artan talebi, geri dönüşüm süreçlerini destekleyen pazarların gelişmesine katkıda bulunur (Cui ve Zhang, 2008).

Elektronik atıkların geri dönüşümü, ekonomik açıdan önemli faydalar sağlamaktadır. Değerli kaynakların kazanılması, istihdam olanaklarının yaratılması, maliyet tasarrufu, yeşil ekonomiye geçiş ve yeni pazar fırsatları, geri dönüşüm süreçlerinin ekonomik değerini artıran unsurlardır. Bu nedenle, elektronik atıkların etkili bir şekilde geri dönüştürülmesi, sürdürülebilir ekonomik büyüme için kritik bir öneme sahiptir.

1.9 Geri Dönüşüm Süreçlerinin İyileştirilmesi

Geri dönüşüm süreçlerinin etkinliği, çevresel ve ekonomik faydaların artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Elektronik atıkların geri dönüşümünde, mevcut uygulamaların iyileştirilmesi, hem kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar hem de atıkların çevreye olan etkilerini azaltır. Bu bölümde, geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik öneriler ve stratejiler incelenecektir.

Geri dönüşüm süreçlerinin modernizasyonu, etkinliği artırabilir:

a.Otomasyon ve Robot Teknolojileri: Atık ayrıştırma ve işleme süreçlerinde otomasyon kullanımı, verimliliği artırarak insan hatalarını azaltır. Robot teknolojileri, hassas ve hızlı ayrıştırma yaparak geri dönüşüm oranlarını yükseltebilir.

b.Yüksek Teknoloji Ekipmanlar: Elektronik atıkların işlenmesinde kullanılan ekipmanların güncellenmesi, metal ve malzeme geri kazanımını artırır. Örneğin, manyetik ve elektromanyetik ayrıştırma sistemleri, değerli metallerin etkin bir şekilde ayrıştırılmasını sağlar (Kumar vd., 2019).

Toplumda geri dönüşüm bilincinin artırılması, geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesine katkıda bulunur:

a.Eğitim Programları: Geri dönüşüm süreçleri hakkında halkı bilgilendiren eğitim programları düzenlemek, atıkların doğru bir şekilde ayrıştırılmasını ve geri dönüştürülmesini teşvik eder.

b.Farkındalık Kampanyaları: Geri dönüşümün önemi ve sağladığı faydalar hakkında farkındalık yaratmak, toplumun geri dönüşüme olan katılımını artırır.

Hükümet ve yerel yönetimlerin geri dönüşüm süreçlerini destekleyen politikalar geliştirmesi gerekmektedir:

a.Teşvikler ve Destekler: Geri dönüşüm endüstrisini teşvik eden finansal destekler, geri dönüşüm süreçlerini iyileştirebilir. Bu tür destekler, geri dönüşüm tesislerinin modernizasyonu ve genişlemesi için kaynak sağlar.

b.Sertifikasyon ve Standartlar: Geri dönüşüm süreçleri için uluslararası standartlar oluşturmak, süreçlerin kalitesini artırır ve güvenilirliği sağlar (Zhang vd., 2018).

Farklı paydaşlar arasında iş birliği, geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesine yardımcı olabilir:

a.Endüstri İş Birlikleri: Geri dönüşüm endüstrisindeki firmaların iş birliği yapması, en iyi uygulamaların paylaşılmasını ve yenilikçi çözümlerin geliştirilmesini sağlar.

b.Akademik ve Araştırma Kurumları ile İş birliği: Üniversiteler ve araştırma kurumlarıyla iş birliği yapmak, geri dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesine yönelik araştırma ve geliştirme projelerini destekleyebilir.

Elektronik ürünlerin tasarım aşamasında geri dönüşümün göz önünde bulundurulması, uzun vadeli çözümler sunar:

a.Modüler Tasarım: Elektronik ürünlerin modüler olarak tasarlanması, bileşenlerin daha kolay ayrıştırılmasını ve geri dönüştürülmesini sağlar.

b.Uzun Ömürlü Ürünler: Ürünlerin dayanıklılığını artırmak, atık miktarını azaltır ve geri dönüşüm ihtiyacını azaltır.

Geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesi, çevresel ve ekonomik faydaların artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Teknolojik iyileştirmeler, eğitim ve farkındalık, mevzuat ve politika geliştirme, iş birliği ve ağ oluşturma ile sürdürülebilir tasarım gibi stratejiler, geri dönüşüm süreçlerinin etkinliğini artırarak daha sürdürülebilir bir gelecek sağlama potansiyeline sahiptir.

2 KAYNAK ÖZETLERİ

Elektronik atıkların (e-atık) geri dönüşümü üzerine yapılan çalışmalar, bu sürecin çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarını kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Bu literatür incelemesi, elektronik atıkların artışı, içerdiği değerli metallerin önemi, geri dönüşüm teknolojileri, çevresel ve ekonomik etkiler ile mevcut süreçlerin iyileştirilmesi konularındaki bulguları bir araya getirmektedir.

a.Elektronik Atıkların Artışı: Son yıllarda, elektronik atıkların küresel olarak artış göstermesi, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir sorun haline gelmiştir. Baldé vd. (2015), 2014 yılında dünya genelinde yaklaşık 41,8 milyon ton elektronik atığın üretildiğini ve bunun her yıl %4 artış gösterdiğini raporlamaktadır. Bu artış, tüketicilerin sık sık yeni teknolojik ürünler edinme eğiliminden kaynaklanmaktadır (Kumar ve Holuszko, 2016).

b.Değerli Metallerin Önemi: Elektronik atıklar, önemli miktarda değerli metal içermektedir. Zeng vd. (2018), elektronik atıkların içinde altın, gümüş, bakır, paladyum gibi metallerin bulunduğunu ve bu metallerin yüksek ekonomik değer taşıdığını belirtmektedir. Altın ve gümüş gibi metallerin geri kazanılması, doğal kaynakların korunmasına yardımcı olurken, ekonomik kazanç sağladığı da vurgulanmaktadır (Mata vd., 2017).

c.Geri Dönüşüm Teknolojileri: Geri dönüşüm süreçleri, elektronik atıkların yönetiminde kritik bir rol oynamaktadır. Wang vd. (2013), çeşitli geri dönüşüm yöntemlerinin ve teknolojilerinin etkinliğini incelemiş ve mevcut yöntemlerin çevresel etkilerini azaltmada yetersiz olduğunu ortaya koymuştur. Gelişmiş teknoloji kullanımı ve işleme yöntemlerinin, atıkların geri kazanım verimliliğini artırabileceği ifade edilmektedir (Zeng vd., 2018).

d.Çevresel ve Ekonomik Faydalar: Geri dönüşüm süreci, çevresel ve ekonomik açıdan birçok fayda sunmaktadır. Elektronik atıkların geri dönüşümü, doğal kaynakların korunmasını sağlar ve toksik maddelerin çevreye yayılmasını önler (Kumar ve Holuszko, 2016). Ekonomik açıdan ise, geri dönüşüm endüstrisi istihdam olanakları yaratmakta ve yeni pazar fırsatları sunmaktadır (Mata vd., 2017).

e.Mevcut Süreçlerin İyileştirilmesi: Mevcut geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır. Literatürde, geri dönüşüm süreçlerinin verimliliğinin artırılması için yenilikçi işleme teknolojilerinin ve toplumda farkındalık yaratacak eğitim programlarının uygulanması gerektiği belirtilmektedir (Wang vd., 2013; Zeng vd., 2018).

2.1 Elektronik Atıkların Tanımı ve Türleri

Elektronik atıklar (e-atıklar), elektrik veya elektronik cihazların kullanım dışı kaldığı ya da atıldığı zamanı ifade eder. Bu cihazlar arasında devre kartları, bilgisayarlar, cep telefonları, televizyonlar, buzdolapları, mikrodalga fırınlar, piller ve aküler yer alır. Günlük hayatta sıkça kullanılan teknolojik ürünler, kullanım ömrünü tamamladığında elektronik atık olarak karşımıza çıkar (Baldé vd., 2015). Elektronik atıkların türleri;

a.Büyük Ev Aletleri: Buzdolapları, çamaşır makineleri, kurutma makineleri, bulaşık makineleri ve fırınlar gibi cihazlar bu gruba girer. Bu tür atıkların içeriğinde bulunan metal, plastik ve cam malzemeler geri dönüşüm sürecinde ayrıştırılabilir (Zeng vd., 2018).

b.Küçük Ev Aletleri: Ütüler, elektrikli süpürgeler, mikrodalga fırınlar, tost makineleri ve su ısıtıcıları gibi küçük ev aletleri, içeriğinde plastik, metal ve elektronik bileşenler barındırır ve geri dönüşüm için değerlendirilebilir (Wang vd., 2013).

c.Bilgisayar ve Ofis Ekipmanları: Bilgisayarlar, dizüstü bilgisayarlar, yazıcılar, fotokopi makineleri ve tarayıcılar gibi ofis ekipmanları, devre kartları, plastik kaplamalar, metaller ve cam içerir. Bu bileşenler geri dönüştürülebilir (Kumar ve Holuszko, 2016).

d.Tüketici Elektroniği: Cep telefonları, tabletler, dijital kameralar, televizyonlar ve oyun konsolları, değerli metaller, plastikler, cam ve elektronik bileşenler içerir. Bu bileşenler geri dönüşümle ekonomiye kazandırılabilir (Mata vd., 2017).

e.Aydınlatma Ekipmanları: Florasan lambalar, enerji tasarruflu ampuller ve LED lambalar gibi aydınlatma ekipmanları, cam ve civa gibi tehlikeli maddeler ve metaller içerir. Bunlar özel geri dönüşüm yöntemleri gerektirir (Baldé vd., 2015).

f.Elektrikli ve Elektronik Oyuncaklar ve Eğlence Ekipmanları: Elektronik oyuncaklar, oyun konsolları, kumandalı araçlar ve elektronik müzik aletleri gibi eğlence ekipmanları, plastik, metal, cam ve elektronik bileşenler içerir (Zeng vd., 2018).

g.Elektrikli Araç Ekipmanları: Elektrikli otomobiller, elektrikli bisikletler ve akülü araçlar, bataryalar ve elektrik motorları gibi bileşenler içerir ve geri dönüşüm süreçlerinde farklı teknikler kullanılır (Kumar ve Holuszko, 2016).

h.Pil ve Bataryalar: Kalem piller, şarj edilebilir piller, lityum piller ve pil paketleri gibi ürünler, metaller ve tehlikeli kimyasallar içerir. Bu bileşenlerin geri dönüşümü, çevreye zarar vermemesi açısından kritiktir (Wang vd., 2013).

Elektronik atık türleri, içerdikleri malzemeler ve geri dönüşüm süreçleri bakımından farklılık gösterir. Bu nedenle her bir atık türü için doğru ayrıştırma ve geri dönüşüm yöntemleri kullanılmalıdır. Böylelikle hem çevresel hem de ekonomik faydalar elde edilir (Baldé vd., 2015).

2.2 Elektronik Atıkların İçinde Bulunan Değerli Metallerin Önemi ve Kullanım Alanları

Elektronik atıklar içinde bulunan değerli metaller, endüstride önemli bir yer tutar. Bu metaller, elektronik cihazların işleyişinde ve üretiminde kritik roller oynar. Aşağıda bu metallerin önemi ve kullanım alanları sıralanmıştır:

a.Altın (Au)

Önemi: Altın, yüksek elektrik iletkenliği ve oksidasyona karşı dayanıklılığı sayesinde elektronik bileşenlerde sıkça kullanılır. Elektronik atıkların içindeki en değerli metallerden biridir (Zeng vd., 2018).

Kullanım Alanları: Elektronik devre kartları, bağlantı noktaları, yüzey montaj teknolojisi (SMT) bileşenleri, mikroçipler ve sensörler gibi birçok elektronik cihazda altın kullanılır (Kumar ve Holuszko, 2016).

b.Gümüş (Ag)

Önemi: Gümüş, yüksek elektrik iletkenliği ve termal iletkenliği nedeniyle elektronik bileşenlerde ve kontak noktalarında yaygın bir şekilde tercih edilir (Wang vd., 2013).

Kullanım Alanları: Elektronik kontaklar, bağlantı telleri, manyetik anahtarlar, düğmeler, röleler ve mikrofonlar gibi birçok cihazda kullanılır (Baldé vd., 2015).

c.Bakır (Cu)

Önemi: Bakır, elektronik endüstrisinde mükemmel bir elektrik iletkeni olarak kullanılır ve elektronik cihazlarda temel bileşenlerden biridir (Zeng vd., 2018).

Kullanım Alanları: Elektrik kabloları, devre kartları, transformatörler, motorlar ve bobinler gibi birçok elektronik cihazda bakır bulunur (Kumar ve Holuszko, 2016).

d.Kurşun (Pb)

Önemi: Kurşun, elektronik atıklar içinde eski tip lehimlerde kullanılan bir metal olup, çevresel zararları nedeniyle kullanımı azalmıştır (Wang vd., 2013).

Kullanım Alanları: Lehimler, piller, radyasyon koruyucular ve kurşun asit piller gibi çeşitli alanlarda kullanılmıştır (Baldé vd., 2015).

e.Platin (Pt)

Önemi: Platin, korozyona ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması nedeniyle hem elektronik hem de kimya endüstrisinde önem taşır (Baldé vd., 2015).

Kullanım Alanları: Katalitik dönüştürücüler, termal sensörler, elektrolit kapasitörler ve tıbbi cihazlar gibi alanlarda platin kullanılır (Kumar ve Holuszko, 2016).

f.Paladyum (Pd)

Önemi: Paladyum, elektriksel iletkenliği ve kimyasal dayanıklılığı ile dikkat çeker ve altın veya platin yerine kullanılabilir (Wang vd., 2013).

Kullanım Alanları: Katalitik dönüştürücüler, sensörler, kondansatörler, cep telefonları gibi elektronik cihazlarda paladyum tercih edilir (Zeng vd., 2018).

Bu değerli metaller, elektronik cihazların üretiminde ve işleyişinde hayati rol oynar. Elektronik atıkların geri dönüşümü, bu metallerin yeniden kullanılmasını sağlayarak hem çevresel sürdürülebilirliği artırır hem de ekonomik açıdan önemli faydalar sunar (Zeng vd., 2018).

2.3 Geri Dönüşüm Teknolojileri ve Süreçleri

Geri dönüşüm teknolojileri ve süreçleri, elektronik atıklardan değerli metallerin geri kazanılmasını sağlayarak hem çevresel hem de ekonomik faydalar sunar. Aşağıda, yaygın olarak kullanılan geri dönüşüm yöntemleri detaylandırılmıştır:

a.Mekanik Geri Dönüşüm

Öğütme (Shredding): Elektronik atıklar, özel ekipmanlar yardımıyla küçük parçalara ayrılır ve ardından öğütülerek daha küçük parçalara dönüştürülür (Kumar ve Holuszko, 2016).

Ayırma (Sorting): Öğütülen malzeme, manyetik ayırıcılar, hava tabanlı ayırıcılar ve titreşimli elekler gibi ekipmanlar kullanılarak yoğunluklarına ve boyutlarına göre ayrılır (Zeng vd., 2018).

b.Kimyasal Geri Dönüşüm

Asitleme (Acid Leaching): Değerli metaller, sülfürik asit gibi kimyasallar yardımıyla atıklardan ayrılır. Bu işlem, metal oksitlerini çözünür hale getirir ve metal tuzları çözeltiden ayrılır (Cui ve Zhang, 2008).

Elektroliz (Electrolysis): Asitleme işleminden elde edilen metal çözeltileri, elektroliz yoluyla saf metallere dönüştürülür (Zeng vd., 2018).

c.Termal Geri Dönüşüm

Pirometalurji (Pyrometallurgy): Elektronik atıklar, yüksek sıcaklıklarda eritilerek metaller oksitlenir ve saflaştırılır. Bu süreçte ergitme fırınları ve indüksiyon ocakları kullanılır (Kumar ve Holuszko, 2016).

Termal Dönüştürme (Thermal Conversion): Atıklar yakılarak ısı enerjisi elde edilir ve kalan metal kalıntıları geri kazanılır (Cui ve Zhang, 2008).

d.Biyolojik Geri Dönüşüm

Biometal (Biometallurgy): Mikroorganizmalar kullanılarak değerli metaller geri kazanılır. Bakteriler metal iyonlarını çözelti haline getirir ve metallerin saflaştırılmasına olanak tanır (Baldé vd., 2015).

e.Elektrostatik Ayırma

Bu süreçte, elektronik atıklar yüksek voltajlı elektrotlar yardımıyla elektrostatik yük farklarına göre ayrılır. Farklı malzemeler elektrostatik kuvvetler yardımıyla çekilerek ayrıştırılır (Zeng vd., 2018).

f.Biyolojik Ayırma

Biyolojik organizmalar, özellikle plastiklerin parçalanmasına yardımcı olabilir. Biyolojik süreçler elektronik atıkların doğal olarak ayrışmasını sağlar (Kumar ve Holuszko, 2016).

Bu geri dönüşüm teknolojileri, elektronik atıkların verimli yönetilmesine olanak tanır ve değerli metallerin geri kazanılmasıyla hem çevresel etkileri azaltır hem de ekonomik kazanç sağlar.

2.4 Önceki Çalışmaların Bulguları ve Önerileri

Önceki çalışmaların bulguları ve önerileri, elektronik atıkların yönetimi ve değerli metal geri kazanımı açısından yol gösterici nitelikte önemli bilgiler sunmaktadır.

Bulgular

a.Geri Dönüşüm Oranları: Çeşitli çalışmalar, elektronik atıkların geri dönüşüm oranlarının oldukça düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Dünya genelinde e-atıkların büyük bir kısmı hala geri dönüştürülmemekte ve atık depolama sahalarına gönderilmektedir (Baldé vd., 2017).

b.Değerli Metal İçeriği: Elektronik atıkların içindeki altın, gümüş, bakır ve paladyum gibi değerli metallerin oranı oldukça yüksektir. Bu metallerin geri kazanılması, ekonomik açıdan büyük bir potansiyel sunmaktadır (Cui ve Zhang, 2008).

c.Çevresel Etkiler: Elektronik atıkların doğaya zararlı toksik maddeler içerdiği ve bu atıkların kontrolsüz bir şekilde doğaya karışmasının çevre kirliliğine yol açtığı vurgulanmaktadır. Özellikle kurşun, civa ve kadmiyum gibi maddeler insan sağlığı için tehlike oluşturabilir (Widmer vd., 2005).

d.Teknolojik Gelişmeler: Teknolojinin hızlı değişimi, cihazların daha kısa ömürlü olmasına neden olmakta ve bu da elektronik atık miktarını sürekli artırmaktadır (Kumar ve Holuszko, 2016).

Öneriler

a.Geri Dönüşüm Altyapısının Geliştirilmesi: Elektronik atıkların verimli bir şekilde işlenebilmesi için geri dönüşüm altyapısının güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu, daha modern tesisler ve teknolojilerin kullanılmasını içerir (Zeng vd., 2018).

b.Farkındalık ve Eğitim: Tüketicilere yönelik bilinçlendirme kampanyaları artırılmalı ve elektronik atıkların doğru bir şekilde nasıl ayrıştırılacağı ve geri dönüştürüleceği konusunda eğitim verilmelidir (Kumar ve Holuszko, 2016).

c.Yasal Düzenlemeler: Elektronik atık yönetimi konusunda ulusal ve uluslararası standartlar belirlenmeli ve daha katı yasal düzenlemeler uygulanmalıdır. Bu, özellikle e-atık ihracatının kontrol altına alınmasını da içermelidir (Widmer vd., 2005).

d.Ekonomik Teşvikler: Elektronik atık geri dönüşümünü teşvik etmek için devletler tarafından vergi indirimleri, geri dönüşüm hibe programları ve özel teşvikler sağlanmalıdır (Zeng vd., 2018).

e.Teknolojik İyileştirmeler: Geri dönüşüm süreçlerinde daha çevre dostu ve verimli teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu, atıkların daha etkin bir şekilde ayrıştırılmasını ve geri kazanılmasını sağlayacaktır (Cui ve Zhang, 2008).

Bu bulgular ve öneriler, gelecekteki araştırmalar ve politika geliştirme süreçleri için önemli bir rehber sunmaktadır. Elektronik atıkların yönetimi ve geri kazanımı ile ilgili yapılacak çalışmalar, bu temeller üzerinden ilerleyerek çevresel ve ekonomik sorunları ele almayı hedeflemelidir.



3 YÖNTEM

3.1 Literatür Taraması ve Veri Toplama Yöntemleri

3.1.1 Literatür taraması

Elektronik atıkların yönetimi ve geri dönüşümü üzerine yapılan araştırmaların incelenmesi için çeşitli yöntemler kullanılır. Bu alandaki literatürü araştırmak, farklı kaynaklardan elde edilen bilgilerin karşılaştırılması ve yorumlanması açısından önemlidir. Elektronik atıkların çevresel etkileri, geri dönüşüm teknolojileri, yasal düzenlemeler ve ekonomik faydaları konularında geniş kapsamlı bir literatür taraması yapılabilir.

a. Online Veritabanları ve Araştırma Makaleleri

Elektronik atıkların yönetimi ve geri dönüşümü üzerine yapılan çalışmalara ulaşmak için, online veritabanları büyük bir bilgi kaynağıdır. PubMed, Google Scholar, IEEE Xplore gibi veritabanları elektronik atık yönetimi ve geri dönüşümü konusunda yayınlanmış bilimsel makaleler, tezler ve raporlar içermektedir (Sharma ve Yadav, 2020). Bu veritabanları, elektronik atıkların türleri, yönetim stratejileri ve geri dönüşüm süreçleri hakkında kapsamlı bilgiler sağlar.

b. Akademik ve Bilimsel Dergiler

Elektronik atıklar hakkında yayın yapan Waste Management, Resources, Conservation and Recycling, Journal of Cleaner Production gibi prestijli dergiler, elektronik atıkların çevresel etkileri, geri dönüşüm teknolojileri ve sürdürülebilirlik politikaları üzerine derinlemesine bilgi sunmaktadır (Kumar ve Holuszko, 2016). Bu dergilerdeki makaleler, bilimsel araştırmaların sonuçlarını ve çeşitli elektronik atık yönetim yöntemlerini analiz etmek için kullanılabilir.

c. Raporlar ve Belgeler

Elektronik atık yönetimi üzerine çalışan hükümetler, uluslararası kuruluşlar (örneğin, Birleşmiş Milletler Çevre Programı, Avrupa Çevre Ajansı) ve sivil toplum kuruluşları tarafından hazırlanan raporlar da literatür taramasının önemli bir parçasıdır (Baldé vd., 2017). Bu raporlar, elektronik atıkların küresel ve yerel boyutları hakkında istatistiksel

veriler ve analizler sunarak politikaların ve uygulamaların anlaşılmasına katkıda bulunur.

3.1.2 Veri toplama yöntemleri

a.Makale ve Rapor Analizi

Literatür taraması sırasında toplanan makaleler ve raporlar, geri dönüşüm teknolojileri, çevresel etkiler ve ekonomik analizler üzerine detaylı bilgi sağlar. Elektronik atıkların çevreye olan zararlı etkileri ve bu etkileri azaltmak için kullanılan geri dönüşüm yöntemleri hakkında geniş bilgi elde etmek mümkündür (Cui ve Zhang, 2008).

b.Anketler ve Görüşmeler

Elektronik atık yönetimi üzerine çalışan uzmanlar, geri dönüşüm tesislerinin yöneticileri veya endüstri temsilcileri ile yapılan anketler ve görüşmeler, sektördeki mevcut uygulamalar hakkında birinci elden bilgi sağlar. Özellikle geri dönüşüm süreçlerinde karşılaşılan zorluklar ve iyileştirme önerileri bu yöntemle elde edilebilir (Zeng vd., 2018).

c.Veritabanları ve İstatistikler

Elektronik atıkların bileşimi, miktarı ve geri dönüşüm oranları ile ilgili veritabanlarından elde edilen bilgiler, küresel ve ulusal bazda durumu değerlendirmek için önemlidir. Avrupa İstatistik Ofisi ve ABD Çevre Koruma Ajansı gibi kurumların sağladığı istatistiksel veriler, elektronik atık yönetimi hakkında güvenilir veritabanları sunar (Widmer vd., 2005).

d.Alan Araştırmaları

Geri dönüşüm tesislerinin işleyişini ve kullanılan teknolojileri yerinde gözlemlemek, geri dönüşüm süreçlerinin detaylı bir şekilde anlaşılmasına olanak tanır. Bu yöntem, geri dönüşüm süreçlerinin pratik uygulamalarını ve teknolojik gelişmeleri anlamak için saha çalışmaları ile desteklenir (Cui ve Zhang, 2008).

3.2 Elektronik Atık İşleme Tesislerinin ve Geri Dönüşüm Teknolojilerinin İncelenmesi

Elektronik atık geri dönüşüm tesisleri, kullanılamaz hale gelen elektronik cihazların çevresel ve ekonomik açıdan verimli bir şekilde geri dönüştürülmesini sağlayan özel işletmelerdir (UNEP, 2019). Bu tesislerde, elektronik atıklar ayrıştırılır, işlenir ve içerisindeki değerli metaller, plastikler, cam gibi yeniden kullanılabilir malzemeler geri kazanılır (Baldé vd., 2020). Tesisler hem çevresel sorumlulukları yerine getirmek hem de elektronik atıkların içindeki değerli kaynakları ekonomiye kazandırmak için önemli bir işlev üstlenir (Garlapati, 2016).

3.2.1 Tesisin amacı

Elektronik atık geri dönüşüm tesislerinin temel amacı, elektronik cihazların (cep telefonları, bilgisayarlar, televizyonlar, beyaz eşyalar vb.) kullanım ömrünü tamamladıktan sonra çevreye zarar vermeden yeniden işlenmesi ve bu süreçte değerli metallerin geri kazanılmasıdır (Kahhat ve Williams, 2012). Bu tesislerin işleyişi, hammadde teminini sürdürülebilir hale getirir ve atık yönetimi problemlerini çözmeye yardımcı olur (Widmer vd., 2005).

3.2.2 Tesisin yapısı ve bölümleri

Bir elektronik atık geri dönüşüm tesisi genel olarak şu bölümlerden oluşur:

3.2.2.1 Toplama ve depolama alanı

Tesislerin ilk adımı, toplama ve depolama alanıdır. Elektronik atıklar genellikle belediyeler, özel geri dönüşüm firmaları, perakende mağazalar ya da bireysel kullanıcılar tarafından toplanır ve bu alanda biriktirilir (Herat, 2007). Toplama ve depolama süreci, geri dönüşüm zincirinin başlangıcıdır. Burada atıklar kategorilere ayrılır (bilgisayarlar, telefonlar, televizyonlar, beyaz eşyalar) (Forti vd., 2020).

3.2.2.2 Ön işleme ve demontaj bölümü

Toplanan elektronik atıklar ön işlemeye tabi tutulur. Bu süreçte, atıklar manuel veya otomatik yöntemlerle parçalarına ayrılır (Cui ve Zhang, 2008). Özellikle toksik veya tehlikeli bileşenlerin (piller, ekranlar, devre kartları) güvenli bir şekilde çıkarılması

önemlidir (Cucchiella vd., 2015). Bu aşama, çevre ve insan sağlığına zarar verebilecek maddelerin bertaraf edilmesini sağlar (Li vd., 2007).

3.2.2.3 Parçalama (shredding) ve mekanik ayırma

Elektronik atıklar, büyük ölçekli mekanik parçalama makineleri ile küçük parçalara ayrılır (Zhang ve Forssberg, 1997). Parçalama işlemi sonrası malzemeler yoğunluklarına, iletkenliklerine ve manyetik özelliklerine göre çeşitli ayırıcılar yardımıyla ayrıştırılır (Tsydenova ve Bengtsson, 2011). Manyetik ayırıcılar demir bazlı metalleri geri kazanırken, elektrostatik ayırıcılar plastik ve metal karışımlarını ayırır (Oguchi vd., 2011).

3.2.2.4 Kimyasal ve termal işleme

Elektronik atıkların içerisinde bulunan değerli metallerin (altın, gümüş, bakır, paladyum vb.) geri kazanılması için kimyasal ve termal işlemler uygulanır (Hagelüken, 2006). Kimyasal işlemde asitleme (leaching) ve elektroliz gibi yöntemler kullanılırken, termal işlemde pirometalurji ile yüksek sıcaklıklarda metaller ayrıştırılır (UNEP, 2013). Bu süreçler, yüksek teknolojiye fırınlar ve kimyasal reaktörlerle yapılır.

3.2.2.5 Bertaraf ve geri kazanım

Elektronik atıkların işlenmesinden sonra elde edilen malzemeler (metaller, plastikler, cam vb.) yeniden kullanıma uygun hale getirilir ve endüstrilere geri kazandırılır (Bandyopadhyay, 2008). Tehlikeli bileşenler ise uygun bertaraf yöntemleriyle imha edilir.

3.2.3 Tesis kapasitesi ve teknolojik imkanlar

Bir elektronik atık geri dönüşüm tesisinin kapasitesi, topladığı ve işlediği atık miktarına bağlı olarak değişir (Kumar vd., 2017). Gelişmiş tesisler, yılda yüzbinlerce ton elektronik atığı işleyebilir (Zeng vd., 2017). Teknolojik imkanlar, tesisin verimliliğini belirleyen en önemli unsurlardan biridir (Khetriwal vd., 2009). Örneğin:

Otomatik Ayırıcılar: Gelişmiş tesislerde malzemeler, otomatik ayırma makineleri ile verimli bir şekilde sınıflandırılır (Heacock vd., 2016). Manyetik, elektrostatik ve

yoğunluk tabanlı ayırıcılar kullanılarak metaller, plastikler ve diğer malzemeler kolayca ayrılır (Oguchi vd., 2013).

Pirometalurji ve Hidrometalurji Ekipmanları: Yüksek teknolojiye sahip pirometalurjik fırınlar ve hidrometalurji reaktörleri, değerli metallerin verimli bir şekilde geri kazanılmasını sağlar (Hagelüken, 2006).

3.2.4 Çevresel ve ekonomik katkılar

Elektronik atık geri dönüşüm tesisleri, çevreye önemli faydalar sağlar (Manomaivibool, 2009). İlk olarak, elektronik cihazlardaki toksik maddelerin (civa, kurşun, kadmiyum) doğaya karışması engellenir ve çevresel kirlilik önlenir. Ayrıca, geri dönüştürülen metallerin ekonomiye kazandırılması, yeni hammadde ihtiyacını azaltır ve doğal kaynakların korunmasına yardımcı olur. Bu da özellikle altın, bakır ve gümüş gibi metallerin fiyatlarında istikrar sağlar ve endüstriyel üretimde maliyet avantajı sunar.

Elektronik atık işleme tesisleri, atıkların geri kazanımını sağlamak ve çevresel zararları en aza indirmek amacıyla farklı teknolojiler ve yöntemler kullanarak işlev görür. Bu tesisler, işledikleri atık türlerine ve kullanılan geri dönüşüm tekniklerine göre sınıflandırılabilir. Her tesisin işlevi, elektronik atıkların güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde işlenmesi ve geri kazanılması üzerinedir (Baldé vd., 2020).

3.3 Mekanik Geri Dönüşüm Tesisleri

Mekanik geri dönüşüm tesisleri, elektronik atıkları fiziksel olarak parçalayarak ve ayırarak geri dönüşüm süreçlerini yürütür. Bu tür tesislerin ana işlevi, malzemeleri fiziksel boyutta işleyerek farklı malzeme türlerini ayırmak ve geri dönüştürülebilir hale getirmektir (Kumar vd., 2017).

3.4 Parçalama (Shredding) ve Öğütme Tesisleri

Bu tesisler, elektronik atıkları büyük makineler yardımıyla küçük parçalara böler. Öğütülen atıklar, metal, plastik ve cam gibi malzemelere ayrılarak yeniden kullanılabilir hale getirilir. Parçalama ve öğütme işlemleri sonrası malzemeler manyetik ayırma, titreşimli elekler ve elektrostatik ayırma gibi tekniklerle desteklenir

(Bandyopadhyay, 2008).

3.5 Ayırma ve Sınıflandırma Tesisleri

Ayırma tesisleri, parçalanmış atıkları metal, plastik ve cam gibi bileşenlerine ayırır. Manyetik ayırıcılar, demir içerikli metalleri çekerken, elektrostatik ayırma makineleri metal ve plastikleri ayırmak için kullanılır. Yoğunluk ayırma gibi yöntemler de bu tesislerde uygulanarak, geri dönüştürülebilir malzemeler ayrılır (Zeng vd., 2017).

3.6 Kimyasal Geri Dönüşüm Tesisleri

Kimyasal geri dönüşüm tesisleri, değerli metallerin ve diğer materyallerin geri kazanılması için kimyasal işlemler kullanır. Bu tesisler, özellikle elektronik atıkların içindeki altın, bakır, paladyum gibi değerli metallerin geri kazanımında etkilidir (Hagelüken, 2006).

3.6.1 Asitleme (leaching) tesisleri

Bu tür tesisler, kimyasal asitlerle (genellikle sülfürik asit) metallerin çözünmesini sağlar. Asitleme işlemi, özellikle değerli metallerin elektronik devre kartlarından ayrılması için kullanılır. Asitle çözündürülen metaller daha sonra elektroliz yoluyla saflaştırılır ve geri kazanılır (Cui ve Zhang, 2008).

3.6.2 Elektroliz tesisleri

Elektroliz tesislerinde, asitle çözülen metal iyonları elektrik akımı yardımıyla saf metale dönüştürülür. Bu tesisler, özellikle altın, bakır ve gümüş gibi metallerin yüksek saflıkta geri kazanılmasında kullanılır (Hagelüken, 2006).

3.7 Termal Geri Dönüşüm Tesisleri

Termal geri dönüşüm tesisleri, yüksek sıcaklık kullanarak metallerin ve diğer materyallerin geri kazanımını sağlar. Bu tesisler, özellikle pirometalurji gibi yüksek sıcaklıkta metal ayrıştırma işlemleri ile ön plana çıkar (Garlapati, 2016).

3.7.1 Pirometalurji tesisleri

Pirometalurji tesisleri, elektronik atıkları yüksek sıcaklıklarda işleyerek metallerin eritilmesini sağlar. Bu süreç, metallerin diğer atıklardan ayrılmasına ve saflaştırılmasına yardımcı olur. Bu tesislerde kullanılan fırınlar, altın, bakır ve diğer değerli metallerin geri kazanılmasında kritik rol oynar (Bandyopadhyay, 2008).

3.7.2 Termal indirgeme tesisleri

Bu tesislerde, elektronik atıklar yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak kimyasal bileşikler indirgenir ve metaller saf halde elde edilir. Termal indirgeme, özellikle kompleks bileşiklerdeki metallerin geri kazanılmasında etkilidir (Cucchiella vd., 2015).

3.8 Biyolojik Geri Dönüşüm Tesisleri

Biyolojik geri dönüşüm tesisleri, mikroorganizmalar veya biyolojik maddeler kullanarak elektronik atıklardaki metalleri ayırır. Bu tesisler, düşük maliyetli ve çevre dostu alternatifler sunduğu için giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Garlapati, 2016).

3.9 Biyometalurji Tesisleri

Bu tesislerde, bakteriler veya diğer mikroorganizmalar kullanılarak metal iyonları çözeltilerden ayrılır. Biyometalurji tesisleri, özellikle düşük enerji tüketimi ve çevre dostu olmaları nedeniyle tercih edilir (Kumar vd., 2017).

3.10 Entegre Geri Dönüşüm Tesisleri

Entegre geri dönüşüm tesisleri, mekanik, kimyasal ve termal süreçleri bir arada kullanarak elektronik atıkları işler. Bu tesisler, çeşitli teknolojilerin avantajlarını birleştirerek yüksek verimlilikle geri dönüşüm sağlar (Zeng vd., 2017).

3.10.1 Çok aşamalı tesisler

Bu tesislerde, elektronik atıklar önce mekanik olarak parçalanır, ardından kimyasal işlemlerle metaller ayrılır ve son olarak termal işlemlerle geri kalan malzemeler işlenir.

Entegre tesisler, yüksek verimlilikleri ve çeşitli malzemeleri geri kazanma kabiliyetleriyle ön plana çıkar (Cui ve Zhang, 2008).

3.11 Elektronik Atık İşleme Tesislerinin Kapasitesi ve Çalışma Prensipleri

Elektronik atık işleme tesislerinin kapasitesi, işleyebildikleri atık miktarına, kullanılan teknolojilere ve geri kazanılabilir malzeme türlerine göre değişir. Her tesisin işleyişi, elektronik atıklardan değerli metallerin ve diğer malzemelerin geri kazanılması için tasarlanmış belirli prensipler doğrultusunda yürütülür. Bu tesislerin kapasitesi ve çalışma prensipleri, ülkelerin geri dönüşüm altyapısı, teknolojik donanım ve işleme metotlarına göre farklılık gösterebilir (Baldé vd., 2020).

3.11.1 Mekanik geri dönüşüm tesisleri

Mekanik geri dönüşüm tesislerinin kapasitesi, atıkların fiziksel olarak parçalanma ve ayırma işlemlerine dayanır. Büyük parçalama makineleri, saatte birkaç tondan onlarca tona kadar atığı işleyebilir. Kapasite genellikle tesiste kullanılan ekipmanların büyüklüğüne ve verimliliğine bağlıdır (Kumar vd., 2017).

3.11.1.1 Parçalama ve öğütme kapasitesi

Bu tür tesisler, günlük 50-200 ton arası elektronik atığı parçalayabilir. Öğütülen atıklar, manyetik ve elektrostatik ayırma teknikleri ile metal, plastik ve diğer malzemeler olarak sınıflandırılır. Tesislerin işleyişi, parçalama işleminin verimliliğine ve ayırma teknolojilerinin doğruluğuna bağlıdır (Zeng vd., 2017).

3.11.1.2 Ayırma ve sınıflandırma prensipleri

Mekanik ayırma tesislerinde, elektronik atıklar çeşitli ayırma makineleri yardımıyla işlenir. Manyetik ayırıcılar demir esaslı metalleri toplarken, elektrostatik ayırıcılar plastikleri ve metallerin ayrımını sağlar. Titreşimli elekler ve yoğunluk ayırma sistemleri de süreci destekler (Bandyopadhyay, 2008).

3.11.2 Kimyasal geri dönüşüm tesisleri

Kimyasal geri dönüşüm tesislerinin kapasitesi, atıkların kimyasal işlemlerle çözülüp, metallerin ayrıştırılması sürecine dayanır. Bu tesisler, genellikle daha düşük

hacimlerde ama daha yüksek değerli atıklar işler. Saatlik kapasite, kullanılan teknolojiye bağlı olarak genellikle birkaç tondur (Hagelüken, 2006).

3.11.2.1 Asitleme kapasitesi

Asitleme tesisleri, elektronik atıklardan değerli metalleri asit banyolarında çözerek geri kazanır. Günlük 10-50 ton atık kapasitesine sahip olan bu tesisler, kimyasal çözücüler kullanarak altın, gümüş, bakır gibi metallerin geri kazanımını sağlar. İşlem süresi ve kimyasal kullanımı, verimlilik açısından kritik öneme sahiptir (Cui ve Zhang, 2008).

3.11.2.2 Elektroliz prensipleri

Elektroliz işlemi ile metallerin saflaştırıldığı bu tesislerde, kimyasal çözeltiden metal iyonları elektrotlar yardımıyla saf metale dönüştürülür. Elektroliz tesisleri, saatte birkaç kilodan birkaç tona kadar metal geri kazanabilir. Saflaştırma işlemi ve elektrotların kapasitesi, tesisin verimliliğini belirler (Hagelüken, 2006).

3.11.3 Termal geri dönüşüm tesisleri

Termal geri dönüşüm tesislerinin kapasitesi, yüksek sıcaklıklarda elektronik atıkların işlenmesine dayanır. Bu tür tesisler, büyük fırınlar veya ergitme ocakları kullanarak büyük miktarlarda atık işleyebilir. Pirometalurjik tesislerin kapasitesi genellikle günde 100-500 ton civarındadır (Garlapati, 2016).

3.11.3.1 Pirometalurji kapasitesi

Pirometalurji tesisleri, metallerin geri kazanılması için yüksek sıcaklıkta ergitme işlemi uygular. Büyük ergitme fırınları, günde 200-500 ton atığı işleyebilir. Bu tesislerde, metaller eriyik halde birbirinden ayrılır ve daha sonra saflaştırılır (Cucchiella vd., 2015).

3.11.3.2 Termal indirgeme prensipleri

Termal indirgeme, elektronik atıkların yüksek sıcaklıkta kimyasal reaksiyonlarla metal oksitlerinin ayrılması işlemidir. Bu tesisler, günlük 50-300 ton atık işleyebilir ve

özellikle karmaşık bileşiklerden metallerin geri kazanılmasını sağlar (Bandyopadhyay, 2008).

3.11.4 Biyolojik geri dönüşüm tesisleri

Biyolojik geri dönüşüm tesislerinin kapasitesi, kullanılan mikroorganizmaların ve biyolojik süreçlerin etkinliğine bağlıdır. Bu tesisler genellikle daha küçük ölçekli olup, günlük birkaç ton ile sınırlı bir atık işleme kapasitesine sahiptir (Garlapati, 2016).

3.11.4.1 Biyometalurji kapasitesi

Biyometalurji tesislerinde, mikroorganizmalar metal iyonlarını çözeltiden ayırır. Günlük 1-10 ton elektronik atık işleme kapasitesine sahip bu tesisler, düşük enerji tüketimi ve çevre dostu bir geri dönüşüm süreci sunar. Ancak, biyolojik süreçlerin daha uzun sürede gerçekleşmesi bu tesislerin kapasitesini sınırlar (Kumar vd., 2017).

3.11.4.2 Biyolojik ayırma prensipleri

Bu tesislerde, mikroorganizmalar veya bitkiler yardımıyla metal bileşiklerinin ayrılması sağlanır. İşleme süresi diğer teknolojilere göre daha uzun olsa da düşük enerji maliyeti ve çevresel sürdürülebilirlik avantaj sağlar (Zeng vd., 2017).

3.11.5 Entegre geri dönüşüm tesisleri

Entegre tesisler, birden fazla geri dönüşüm yöntemini bir arada kullanarak daha geniş bir kapasiteye sahip olabilir. Bu tesisler genellikle günlük 100-500 ton atık işleyebilir (Cui ve Zhang, 2008).

3.11.5.1 Çok aşamalı tesis kapasitesi

Çok aşamalı tesisler, mekanik, kimyasal ve termal işlemleri bir arada kullanır. Bu tesislerde kapasite, kullanılan ekipmanların sayısı ve verimliliğine göre değişebilir. Günlük 100-500 ton arasında elektronik atık işleyebilen bu tesisler, çok sayıda malzemenin geri kazanılmasını sağlar (Baldé vd., 2020).

3.12 Farklı Bölgelerdeki Elektronik Atık İşleme Tesislerinin Karşılaştırılması

Elektronik atık işleme tesislerinin işleyişi, geri dönüşüm teknolojileri ve kapasiteleri, bölgelerin ekonomik gelişmişlik seviyelerine, çevresel düzenlemelere ve atık yönetim altyapılarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu bağlamda, gelişmiş ülkelerdeki tesisler daha ileri teknolojilere ve daha yüksek geri dönüşüm kapasitelerine sahipken, gelişmekte olan bölgelerdeki tesisler genellikle daha düşük teknolojiye sahip olup, iş gücü yoğun süreçlerle çalışmaktadır (Kumar vd., 2017).

3.12.1 Avrupa birliği (AB) tesisleri

AB, elektronik atıkların yönetimi ve geri dönüşümünde lider bölgelerden biridir. AB'deki elektronik atık işleme tesisleri, çevreyi korumayı amaçlayan katı düzenlemelerle denetlenir ve bu nedenle ileri teknolojiler kullanılarak yüksek oranlarda geri dönüşüm sağlanır. Avrupa Birliği'nde elektronik atık işleme kapasitesi oldukça yüksektir; bazı büyük tesisler, günde 500-1000 ton elektronik atık işleyebilir. AB'deki tesislerde, mekanik, kimyasal ve termal geri dönüşüm yöntemleri sıkça kullanılır ve bu süreçler gelişmiş otomasyon sistemleri ile desteklenir (Baldé vd., 2020).

3.12.1.1 Teknoloji ve süreçler

AB tesislerinde mekanik ve kimyasal süreçler oldukça yaygındır. Atıklar, ileri düzeyde öğütülerek ve hassas ayırma teknolojileri ile ayrıştırılır. Termal geri dönüşüm tesislerinde ise pirometalurji, yüksek sıcaklıklarda metal ayrıştırmak için kullanılır. Ayrıca AB'de biyometalurji gibi yenilikçi teknolojiler de test edilmektedir (Hagelüken, 2006).

3.12.1.2 Çevresel düzenlemeler

AB'de elektronik atık yönetimi, "Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar Direktifi" (WEEE Directive) ile sıkı bir şekilde düzenlenmiştir. Bu düzenleme, elektronik atıkların toplanmasını, taşınmasını ve geri dönüştürülmesini kapsayan kapsamlı bir mevzuat sunar. Ayrıca AB, geri dönüştürülen malzemelerin en az %85'inin tekrar kullanılmasını zorunlu kılmaktadır (Zeng vd., 2017).

3.12.2 Amerika Birleşik Devletleri (ABD) tesisleri

ABD’de elektronik atık işleme tesisleri, büyük bir ölçek ve kapasiteye sahiptir. Tesislerin çoğu özel sektör tarafından işletilmekte olup, geri dönüşüm teknolojileri bakımından çeşitlilik göstermektedir. ABD’deki tesisler genellikle büyük ve modern olup, günlük 200-1000 ton arasında atık işleyebilmektedir. Ancak, Avrupa’ya kıyasla daha gevşek çevresel düzenlemeler nedeniyle geri dönüşüm oranları nispeten düşüktür (Kumar vd., 2017).

3.12.2.1 Teknoloji ve süreçler

ABD’deki tesislerde mekanik geri dönüşüm süreçleri yaygındır. Özellikle parçalama, öğütme ve manyetik ayırma teknikleri sıklıkla kullanılmaktadır. ABD ayrıca pirometalurjik süreçlerde dünya liderlerinden biri olup, yüksek miktarda metali geri kazanabilen büyük ergitme fırınlarına sahiptir. Ancak, biyometalurji gibi yenilikçi teknolojilerin kullanımı sınırlıdır (Cucchiella vd., 2015).

3.12.2.2 Çevresel düzenlemeler

ABD’de çevresel düzenlemeler eyalet bazında değişiklik göstermektedir. Federal düzeyde elektronik atık yönetimi konusunda ulusal bir yasa bulunmamakla birlikte, bazı eyaletler elektronik atıkların geri dönüştürülmesini zorunlu hale getiren yasalar çıkarmıştır. Ancak, AB’ye kıyasla çevresel düzenlemelerin genel olarak daha esnek olduğu söylenebilir (Hagelüken, 2006).

3.12.3 Çin tesisleri

Çin, dünyadaki elektronik atıkların büyük bir kısmını geri dönüştüren ülkelerden biridir. Çin’deki tesisler hem gelişmiş hem de ilkel geri dönüşüm yöntemleri kullanmaktadır. Gelişmiş tesislerde mekanik ve kimyasal geri dönüşüm teknolojileri kullanılırken, kırsal alanlarda ve küçük işletmelerde ilkel ve çevreye zarar veren yöntemler de görülmektedir (Zeng vd., 2017).

3.12.3.1 Teknoloji ve süreçler

Çin’deki büyük ölçekli tesisler, gelişmiş mekanik geri dönüşüm teknikleri kullanarak günde 100-500 ton arasında elektronik atık işleyebilir. Ancak, küçük ölçekli tesisler

genellikle manuel işleme dayalıdır ve geri kazanılan metallerin miktarı daha düşüktür. Çin’de pirometalurjik süreçler de yaygındır, ancak bu işlemler genellikle yüksek kirlilik seviyeleri ile ilişkilendirilir (Bandyopadhyay, 2008).

3.12.3.2 Çevresel düzenlemeler

Çin’de elektronik atık yönetimi konusunda son yıllarda sıkı düzenlemeler getirilmiştir. Hükümet, geri dönüşüm tesislerinin modernizasyonu ve ilkel yöntemlerin terk edilmesi için teşvik programları uygulamaktadır. Ancak, hala yasadışı geri dönüşüm faaliyetleri yaygındır ve çevresel kirlilik bir sorundur (Cui ve Zhang, 2008).

3.12.4 Hindistan tesisleri

Hindistan, elektronik atık işleme konusunda Çin’e benzer bir duruma sahiptir. Ülkede hem modern hem de ilkel geri dönüşüm yöntemleri kullanılmaktadır. Gelişmiş tesislerde mekanik ve kimyasal süreçler yer alırken, kırsal bölgelerde hala manuel ve tehlikeli yöntemler kullanılmaktadır (Garlapati, 2016).

3.12.4.1 Teknoloji ve süreçler

Hindistan’daki gelişmiş tesisler, saatte birkaç yüz ton elektronik atık işleyebilir. Bu tesisler, mekanik öğütme ve manyetik ayırma tekniklerini kullanır. Ancak, birçok küçük işletme geri dönüşüm işlemlerini el işçiliği ile yürütmekte ve toksik maddelerin çevreye yayılmasına neden olmaktadır (Kumar vd., 2017).

3.12.4.2 Çevresel düzenlemeler

Hindistan’da elektronik atıkların yönetimine yönelik düzenlemeler son yıllarda gelişmiştir. 2016 yılında kabul edilen "Elektronik Atık Yönetimi Kuralları" ile geri dönüşüm zorunlu hale getirilmiştir. Ancak, bu düzenlemelerin tam anlamıyla uygulanması zorluklar içermekte ve denetim mekanizmaları yeterli düzeyde değildir (Garlapati, 2016).

3.12.5 Gelişmekte olan ülkelerdeki tesisler

Afrika ve Güneydoğu Asya gibi gelişmekte olan bölgelerdeki tesisler, genellikle düşük teknolojili ve iş gücü yoğun süreçlere dayanmaktadır. Bu bölgelerde elektronik atık

işleme kapasiteleri sınırlıdır ve geri dönüşüm faaliyetleri çoğunlukla informal sektörde yürütülmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde günlük işleme kapasiteleri birkaç tondan birkaç yüz tona kadar değişebilir, ancak çevresel ve sağlık riskleri büyüktür (Bandyopadhyay, 2008).

3.12.5.1 Teknoloji ve süreçler

Bu bölgelerde ilkel yöntemlerle geri dönüşüm yapılmaktadır. Özellikle açık alanda yakma gibi yöntemler, metallerin geri kazanımında kullanılır, ancak bu süreçler hem işçiler hem de çevre için büyük tehlike arz eder. Gelişmekte olan ülkelerde modern geri dönüşüm teknolojileri nadiren kullanılır (Hagelüken, 2006).

3.12.5.2 Çevresel düzenlemeler

Birçok gelişmekte olan ülkede elektronik atık yönetimi için etkili düzenlemeler bulunmamaktadır. Geri dönüşüm faaliyetleri çoğunlukla kayıt dışı sektörde yürütülmekte ve çevre koruma standartları uygulanmamaktadır. Son yıllarda bu ülkeler uluslararası yardım ve teknoloji transferi ile geri dönüşüm kapasitelerini artırmayı hedeflemektedir (Baldé vd., 2020).

3.12.6 Elektronik atık alım ve sınıflandırma süreçleri

Elektronik atık (e-atık) işleme tesislerindeki geri dönüşüm süreci, atıkların toplanması ve sınıflandırılmasıyla başlar. Bu aşama, geri kazanımın verimliliği ve maliyeti üzerinde büyük etkiye sahiptir. Elektronik atıklar karmaşık yapıda olduklarından, uygun sınıflandırma yöntemleri kullanılmazsa geri dönüşüm süreçleri hem ekonomik açıdan hem de çevresel açıdan olumsuz sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle atık alım ve sınıflandırma, geri dönüşümde kritik bir adımdır (Baldé vd., 2020).

3.13 Atık Alım Yöntemleri

3.13.1 Belediye ve özel toplama sistemleri

Çoğu gelişmiş ülkede elektronik atıklar belediyeler veya özel geri dönüşüm şirketleri tarafından toplanır. Bu toplama sistemleri, özel atık toplama merkezleri veya "getirme merkezleri" aracılığıyla tüketicilerden e-atık kabul eder. Bazı bölgelerde mobil toplama merkezleri, e-atıkların toplanmasını kolaylaştırır (Kumar vd., 2017).

Gelişmekte olan ülkelerde ise genellikle gayri resmi sektörde çalışan bireyler tarafından atıklar toplanır ve genellikle tehlikeli koşullarda işlenir (Bandyopadhyay, 2008).

3.13.2 Üretici sorumluluğu

Avrupa Birliği gibi bölgelerde, "Üretici Sorumluluğu Genişletme" (Extended Producer Responsibility, EPR) prensibi gereğince üreticiler, elektronik atıkların geri dönüşümünden sorumludur. Bu sistemde üreticiler, eski ürünlerini geri almak ve geri dönüştürmek için toplama sistemleri kurmak zorundadırlar. Bu yaklaşım, e-atıkların sorumlu bir şekilde geri dönüştürülmesini sağlar (Hagelüken, 2006).

3.13.3 İnfomal sektör

Gelişmekte olan ülkelerde, e-atıkların önemli bir kısmı gayri resmi sektör tarafından toplanmaktadır. Özellikle Hindistan ve Afrika'da e-atık toplayıcıları, eski elektronik cihazları toplar ve ilkel yöntemlerle işleyerek metallerini geri kazanır. Bu yöntemler, çevre ve insan sağlığı açısından büyük riskler taşır (Garlapati, 2016).

3.13.4 Sınıflandırma süreçleri

Elektronik atıklar, farklı bileşenler içerdiğinden doğru şekilde sınıflandırılması gereklidir. Bu süreç, e-atıkların verimli geri dönüştürülmesi için kritik bir adımdır.

3.13.4.1 Manuel ayırma

İlk sınıflandırma genellikle manuel olarak yapılır. Çalışanlar, cihazları tiplerine göre ayırır ve bunları cam, plastik, metal veya tehlikeli bileşenlere göre sınıflandırır. Bilgisayarlar, cep telefonları, televizyonlar gibi cihazlar farklı kategorilere ayrılır. Manuel sınıflandırma, özellikle hassas bileşenlerin zarar görmeden ayrılması gerektiği durumlarda etkilidir (Zeng vd., 2017).

3.13.4.2 Otomatik ayırma

Gelişmiş geri dönüşüm tesislerinde, otomatik ayırma sistemleri kullanılır. Bu sistemler, manyetik ayırıcılar, optik ayırıcılar ve hava sınıflandırma teknolojileri gibi ekipmanları içerir. Manyetik ayırıcılar, demir içeren metallerin ayrılmasını sağlarken,

optik ayırıcılar malzemeleri renklerine ve türlerine göre ayırır (Cucchiella vd., 2015). Otomatik ayırma sistemleri, geri dönüşüm verimliliğini artırır ve manuel iş gücünü azaltır.

Elektronik atıklar, civa, kurşun, kadmiyum gibi tehlikeli maddeler içerdiğinden, bu maddeler özel yöntemlerle ayrıştırılmalıdır. Bu maddeler, genellikle özel ekipmanlar ve koruyucu önlemler kullanılarak manuel olarak ayıklanır. Özellikle CRT ekranları ve eski piller, yüksek miktarda tehlikeli madde içermektedir ve dikkatli bir şekilde ayrıştırılmalıdır (Baldé vd., 2020).

Elektronik atıklar, farklı bileşenlerden oluştuğundan, geri dönüşüm süreçlerinin verimli olabilmesi için bileşen bazlı ayırma yapılır. Örneğin, devre kartları, işlemciler, kablolar ve metal parçalar farklı kategorilere ayrılır. Bu bileşenler, geri kazanılacak metallerin türüne göre ayrılır ve ayrı geri dönüşüm süreçlerine tabi tutulur (Kumar vd., 2017).

3.14 Verimli Sınıflandırma için Teknolojik Gelişmeler

Son yıllarda, e-atıkların daha verimli bir şekilde sınıflandırılması için yeni teknolojiler geliştirilmiştir. Bunlar arasında robotik ayırma sistemleri, yapay zekâ destekli ayırıcılar ve ileri düzey optik tarayıcılar yer alır. Bu teknolojiler, atıkların daha hassas bir şekilde sınıflandırılmasını sağlar ve geri kazanım oranlarını artırır. Gelişmiş optik ayırıcılar, malzemelerin farklı özelliklerini tarayarak daha doğru bir ayrıştırma işlemi gerçekleştirir (Cucchiella vd., 2015).

3.15 Bölgesel Farklılıklar

Elektronik atık alım ve sınıflandırma süreçleri, bölgesel olarak değişiklik gösterir. Gelişmiş ülkelerde otomatik ayırma sistemleri yaygınken, gelişmekte olan ülkelerde manuel ayırma yöntemleri daha sık kullanılmaktadır. Gelişmiş ülkelerde tehlikeli maddelerin ayrıştırılması konusunda daha katı düzenlemeler ve teknolojiler mevcutken, gelişmekte olan bölgelerde bu süreçler yetersiz kalmaktadır (Bandyopadhyay, 2008).

3.15.1 Elektronik atıkların toplanması ve sınıflandırılması süreçleri

Elektronik atıkların (e-atık) toplanması ve sınıflandırılması, geri dönüşüm zincirinin ilk ve en önemli adımıdır. Etkili bir toplama ve sınıflandırma süreci, değerli metallerin ve malzemelerin verimli bir şekilde geri kazanılmasını sağlar. Bu süreçler, aynı zamanda çevresel etkilerin en aza indirilmesi ve ekonomik faydaların maksimize edilmesi açısından kritik bir rol oynar (Baldé vd., 2020).

3.15.1.1 Elektronik atık toplama yöntemleri

Gelişmiş ülkelerde e-atıklar, belediyeler veya özel şirketler tarafından düzenlenen toplama merkezleri aracılığıyla toplanır. Bu toplama merkezleri, genellikle tüketicilerin eski cihazlarını bırakabileceği geri dönüşüm kutuları, merkezler veya mobil toplama üniteleri şeklinde organize edilir. Ayrıca, perakende mağazaları ve elektronik üreticileri de eski cihazların toplanmasını teşvik eden programlar sunmaktadır (Hagelüken, 2006).

Avrupa Birliği'nde yürürlükte olan WEEE (Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman) Direktifi, üreticilerin elektronik ürünlerin ömrünün sonunda geri alınması ve geri dönüştürülmesi sorumluluğunu yükler. Bu, e-atıkların düzenli olarak toplanmasını teşvik eder (Kumar vd., 2017).

Gelişmekte olan ülkelerde e-atıkların büyük bir kısmı gayri resmi sektör tarafından toplanmaktadır. Toplayıcılar, eski cihazları tüketicilerden satın alarak ilkel yöntemlerle metallerini geri kazanır. Bu yöntemler, insan sağlığı ve çevre için ciddi tehlikeler oluştursa da düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle yaygındır (Garlapati, 2016). Hindistan, Nijerya ve Gana gibi ülkelerde bu gayri resmi toplayıcılar önemli bir rol oynar (Bandyopadhyay, 2008).

Bazı ülkelerde, elektronik atıkların geri dönüşüme gönderilmesini teşvik etmek için finansal teşvikler sağlanır. Örneğin, belirli bir miktar e-atık getiren tüketicilere para iadesi veya yeni bir cihazda indirim yapılır. Bu tür programlar, toplama oranlarını artırmada etkili olabilir (Zeng vd., 2017).

3.15.1.2 Sınıflandırma süreçleri

E-atıkların sınıflandırılmasında en yaygın yöntem, manuel sınıflandırmadır. İşçiler, atıkları türlerine göre ayırır; bu süreçte, cihazlar tiplerine (bilgisayarlar, cep telefonları, televizyonlar vb.) ve bileşenlerine göre ayrılır. Örneğin, piller, devre kartları, kablolar ve metal kasalar ayrı kategorilere ayrılır. Manuel sınıflandırma, özellikle tehlikeli maddeler içeren bileşenlerin dikkatlice çıkarılması gerektiğinde kullanılır (Kumar vd., 2017).

Gelişmiş geri dönüşüm tesislerinde, otomatik sınıflandırma sistemleri kullanılır. Bu sistemler, manyetik ayırma, optik tarama, hava akımı ile ayırma ve elektrostatik ayırma gibi teknolojiler içerir. Manyetik ayırıcılar, ferromanyetik metallerin ayrılmasını sağlarken, optik tarayıcılar plastik, cam ve metal gibi malzemeleri renk ve yoğunluklarına göre ayırır (Cucchiella vd., 2015).

Elektronik atıklar, kurşun, civa ve kadmiyum gibi tehlikeli maddeler içerir. Bu maddeler, genellikle elle veya otomatik sistemlerle ayıklanır. Özellikle CRT ekranları ve eski piller, bu tür tehlikeli maddeleri içerdiğinden dikkatli bir şekilde sınıflandırılmalıdır (Baldé vd., 2020).

Elektronik atıklar, içerdikleri farklı bileşenler açısından çeşitli geri kazanım süreçlerine tabi tutulur. Bu nedenle, devre kartları, işlemciler, kablolar ve plastik parçalar gibi bileşenler ayrı ayrı sınıflandırılır. Her bir bileşen, içerdiği malzemenin türüne ve geri kazanım potansiyeline göre ayrıştırılır (Zeng vd., 2017).

3.16 Gelişmiş Teknolojiler ve Bölgesel Farklılıklar

Gelişmiş ülkelerde, e-atık sınıflandırmasında ileri teknolojiler kullanılmaktadır. Robotik ayırma sistemleri, yapay zekâ ile desteklenen optik tarayıcılar ve ileri düzey elektrostatik ayırıcılar, sınıflandırma işlemini hızlandırır ve verimliliği artırır (Cucchiella vd., 2015). Gelişmekte olan ülkelerde ise manuel iş gücü ağırlıklı sınıflandırma yöntemleri yaygın olup, bu durum geri dönüşüm verimliliğini düşürebilmektedir (Bandyopadhyay, 2008).

Sonuç olarak, e-atıkların toplanması ve sınıflandırılması, geri dönüşüm sürecinin temelini oluşturur. Toplama ve sınıflandırma süreçlerinin etkinliği, geri kazanılacak

değerli metallerin miktarını ve çevresel etkileri doğrudan etkiler. Her bölge, kendi toplama ve sınıflandırma yöntemlerini, yerel koşullara ve mevcut teknolojilere göre adapte etmelidir.

3.16.1 Elektronik atık akışı ve ayrıştırma teknikleri

Elektronik atık (e-atık) akışı ve ayrıştırma teknikleri, geri dönüşüm sürecinde değerli malzemelerin geri kazanılmasını sağlayan kritik aşamalardır. Bu aşamalar, toplama sürecinden başlayarak atığın yeniden kullanılabilir bileşenlere ayrılmasına kadar uzanır. Gelişmiş ayrıştırma teknikleri sayesinde, çevreye zarar veren toksik maddelerin etkisi en aza indirilirken, değerli metaller ve malzemeler geri kazanılabilir (Baldé vd., 2020). Aşağıda e-atık akışı ve yaygın olarak kullanılan ayrıştırma teknikleri detaylandırılmaktadır.

3.16.2 Atık akışı

3.16.2.1 Toplama ve taşıma

E-atık akışı, toplama süreciyle başlar. Bu süreç, kullanıcıların eski veya bozulmuş elektronik cihazlarını geri dönüşüm merkezlerine teslim etmesiyle başlar. Resmi geri dönüşüm sistemlerinde, atık toplama noktalarından tesislere taşınır. Toplama sistemleri, şehirlerin geri dönüşüm altyapısına, yasalarına ve tüketici farkındalığına bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Kumar vd., 2017).

3.16.2.2 İlk ayıklama

Toplanan e-atıklar, genellikle ilk olarak elle ayıklanır. Bu aşamada, büyük bileşenler (örneğin televizyonlar, bilgisayar kasaları) ayrıştırılır. Tehlikeli bileşenler, özellikle kurşun, civa, kadmiyum gibi zehirli maddeler içeren piller, CRT monitörleri ve floresan lambalar manuel olarak çıkarılır (Garlapati, 2016).

3.16.2.3 Öğütme ve parçalama

İlk ayıklama işleminden sonra e-atıklar öğütülerek daha küçük parçalara ayrılır. Bu işlem, e-atıkların daha verimli bir şekilde ayrıştırılmasını sağlar. Parçalanmış atıklar, genellikle manyetik ayırıcılar ve hava akımı ayırıcıları kullanılarak daha spesifik kategorilere ayrılır (Cucchiella vd., 2015).

3.16.3 Ayırıştırma teknikleri

3.16.3.1 Manyetik ayırma

Bu teknik, ferromanyetik metallerin (örneğin demir ve çelik) ayrıştırılmasında kullanılır. Manyetik ayırıcılar, parçalanmış e-atıkların içinden demir ve çelik gibi metallerin çekilmesini sağlar. Bu işlem, geri kazanılacak metal miktarını artırmak amacıyla genellikle ilk aşamalardan biridir (Hagelüken, 2006).

3.16.3.2 Eddy current (foucault akımı) ayırma

Manyetik olmayan metallerin (örneğin alüminyum ve bakır) ayrılması için eddy current teknolojisi kullanılır. Bu teknikte, manyetik alan kullanılarak metaller ters yönde hareket ettirilir ve diğer atıklardan ayrılır. Eddy current ayırıcıları, özellikle bakır ve alüminyum gibi değerli metallerin verimli bir şekilde geri kazanılmasını sağlar (Kumar vd., 2017).

3.16.3.3 Elektrostatik ayırma

Elektrostatik ayırma, atıkların yüzey yüküne göre ayrılmasını sağlar. Farklı malzemeler, uygulanan elektrostatik alan içinde farklı şekilde tepki verir ve böylece birbirinden ayrılabilir. Plastik ve metal gibi farklı malzemelerin birbirinden ayrılması için kullanılır (Cucchiella vd., 2015).

3.16.3.4 Optik ayırma

Optik ayırıcılar, ışık dalga boylarını kullanarak e-atıkları bileşenlerine göre ayırır. Bu sistemler, atıkların plastik, cam ve metal gibi bileşenlerini ayırt edebilir. Optik ayırma, renk ve malzeme türüne göre atıkları sınıflandırır ve geri kazanım verimliliğini artırır (Zeng vd., 2017).

3.16.3.5 Hava akımı ile ayırma

Bu teknik, atıkların ağırlığına göre ayrılmasını sağlar. Hafif malzemeler, güçlü hava akımları kullanılarak ayrılırken, ağır metaller ve parçalar dibe çöker. Genellikle plastik ve metalin ayrılmasında kullanılan hava akımı ayırıcıları, verimli bir şekilde atıkların sınıflandırılmasını sağlar (Bandyopadhyay, 2008).

3.16.3.6 Pirometalurji (Yüksek sıcaklıkta ayırma)

Elektronik atıklardan değerli metallerin ayrılmasında kullanılan bir başka yöntem pirometalurjik işlemlerdir. E-atıklar yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak metaller sıvı hale getirilir ve ardından birbirinden ayrılır. Bu yöntem, altın, bakır ve gümüş gibi metallerin geri kazanılmasında yaygın olarak kullanılır. Ancak bu teknik, yüksek enerji tüketimi ve çevresel riskler nedeniyle dikkatli kullanılmalıdır (Garlapati, 2016).

3.16.3.7 Kimyasal leaching (Asitleme)

Kimyasal ayrıştırma teknikleri, e-atıklardan değerli metallerin çözünmesi için asitlerin kullanılmasını içerir. Özellikle altın ve bakır gibi değerli metallerin ayrılması için kullanılır. Bu işlem, genellikle elektroliz ile birleştirilir, böylece çözeltilerdeki metaller saf olarak geri kazanılır (Baldé vd., 2020).

3.16.4 Bölgesel farklılıklar ve uygulamalar

Gelişmiş ülkelerde, daha yüksek teknolojiye dayalı ayrıştırma teknikleri kullanılırken, gelişmekte olan ülkelerde daha çok manuel iş gücüne dayalı teknikler tercih edilmektedir. Gelişmiş ülkelerdeki tesislerde, otomatik sistemler ve gelişmiş ayrıştırma teknolojileri sayesinde geri kazanım oranı daha yüksektir. Öte yandan, gelişmekte olan ülkelerde daha düşük teknoloji ile çalışan tesislerde, e-atıklar ilkel yöntemlerle ayrıştırılmaktadır. Bu da çevresel kirliliğin artmasına neden olabilir (Bandyopadhyay, 2008; Kumar vd., 2017).

Sonuç olarak, elektronik atık akışı ve ayrıştırma süreçleri, geri dönüşüm sürecinin etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Gelişmiş ayrıştırma tekniklerinin kullanılması, değerli metallerin geri kazanımını artırırken, toksik maddelerin çevreye salınımını en aza indirir.

3.17 Otomatik ve Manuel Sınıflandırma Sistemleri

Elektronik atıkların (e-atık) geri dönüşümü, doğru sınıflandırma ve ayrıştırma süreçlerine dayanmaktadır. Sınıflandırma, e-atıkların geri dönüşümüne başlamadan önce, değerli ve tehlikeli malzemelerin ayrılmasını sağlar. Bu süreç iki ana yaklaşımla gerçekleştirilir: otomatik sınıflandırma ve manuel sınıflandırma. Her iki sistemin de

avantajları ve dezavantajları vardır ve bu sistemlerin etkinliği, atık hacmine, geri dönüşüm tesisinin altyapısına ve kullanılan teknolojiye bağlı olarak değişiklik gösterir.

3.17.1 Otomatik sınıflandırma sistemleri

Otomatik sınıflandırma sistemleri, genellikle büyük geri dönüşüm tesislerinde kullanılır ve yüksek teknolojiyle donatılmış cihazlar aracılığıyla atıkların hızlı ve verimli bir şekilde ayrıştırılmasını sağlar. Bu sistemler, manuel sınıflandırmaya göre daha az iş gücü gerektirir ve daha yüksek geri dönüşüm oranlarına ulaşmayı hedefler.

3.17.1.1 Manyetik ayırma

Manyetik ayırma, demir içerikli metallerin diğer atık malzemelerden ayrılmasında kullanılır. Güçlü mıknatıslar, elektronik atıkların içindeki demir ve çelik gibi manyetik metallerin otomatik olarak ayrılmasını sağlar. Bu yöntem, demir bazlı metalleri hızlı ve verimli bir şekilde geri kazanmak için idealdir (Kumar vd., 2017).

3.17.1.2 Eddy current (foucault akımı) ayırma

Bu teknoloji, manyetik olmayan metallerin (örneğin alüminyum ve bakır) ayrıştırılmasını sağlar. Eddy current ayırıcıları, metallerin ters yönde hareket ettirilmesini sağlamak için güçlü bir manyetik alan oluşturur ve böylece bu metaller diğer malzemelerden ayrılır (Garlapati, 2016).

3.17.1.3 Optik ayırma

Optik ayırıcılar, e-atık içindeki plastik, cam ve metal gibi malzemeleri, ışık dalga boylarına göre otomatik olarak sınıflandırır. Bu teknoloji, atık malzemelerin rengine ve yapısına göre ayrılmasını sağlar ve özellikle karmaşık malzemelerin bulunduğu e-atıkların işlenmesinde kullanılır (Cucchiella vd., 2015).

3.17.1.4 Elektrostatik ayırma

Elektrostatik ayırma, e-atıkların yüzey yükü farklarına göre ayrılmasını sağlayan bir teknolojidir. Elektriksel alanlar kullanılarak malzemeler arasında elektrostatik kuvvetler yaratılır ve bu sayede plastik ve metal gibi farklı malzemeler otomatik olarak ayrıştırılır (Zeng vd., 2017).

3.17.1.5 Hava akımı ile ayırma

Bu teknik, atıkların yoğunluklarına ve ağırlıklarına göre ayrılmasını sağlar. Atık malzemeler güçlü bir hava akımıyla farklı fraksiyonlara ayrılır. Özellikle hafif plastik ve ağır metal parçalarının birbirinden ayrılmasında kullanılır (Bandyopadhyay, 2008).

3.17.1.6 Robotik ayırıcılar

Gelişmiş tesislerde, yapay zekâ destekli robotlar e-atıkları türlerine göre ayırabilir. Bu robotlar, optik ve diğer sensörler yardımıyla atık malzemeleri tanıyabilir ve ayrıştırma işlemini gerçekleştirebilir. Robotik ayırıcılar, insan hatasını en aza indirir ve geri kazanım oranlarını artırır (Baldé vd., 2020).

3.17.2 Manuel sınıflandırma sistemleri

Manuel sınıflandırma, genellikle gelişmekte olan ülkelerde ve daha küçük geri dönüşüm tesislerinde tercih edilir. Bu sistemde, işçiler atık malzemeleri elle ayrıştırarak değerli ve tehlikeli bileşenleri ayırırlar. Otomatik sistemlerin bulunmadığı ya da yetersiz kaldığı yerlerde manuel sınıflandırma önemli bir rol oynar.

3.17.2.1 Elle ayrıştırma

Manuel sınıflandırmanın temel bileşeni, işçilerin elleriyle e-atıkları parçalara ayırmasıdır. İşçiler, atıkların içindeki plastik, cam, metaller, piller ve diğer tehlikeli bileşenleri ayırır. Bu süreç, düşük teknoloji ve maliyetli tesislerde yaygındır ancak iş güvenliği risklerini beraberinde getirir (Kumar vd., 2017).

3.17.2.2 Tehlikeli malzemelerin çıkarılması

Manuel sınıflandırma sırasında işçiler, özellikle tehlikeli atıkları (örneğin, CRT monitörleri, piller, civa içeren bileşenler) dikkatle ayırır. Bu işlem, çevreye zarar vermemesi ve insan sağlığı açısından büyük önem taşır (Garlapati, 2016).

3.17.2.3 Düşük teknoloji kullanımı

Manuel sınıflandırma genellikle düşük teknolojiye dayandığı için makine yatırımı gerektirmez. Ancak bu sistem daha fazla iş gücü gerektirir ve geri kazanım oranları otomatik sistemlere göre daha düşük olabilir (Cucchiella vd., 2015).

3.17.2.4 Esneklik

Manuel sınıflandırma, e-atıkların karmaşıklığına göre daha esnek bir çözüm sunar. İnsan iş gücü, karmaşık ve farklı yapıdaki atıkları daha iyi tanımlayabilir ve ayrıştırabilir. Ancak bu süreç, zaman alıcıdır ve büyük hacimlerde atık işlenmesi gerektiğinde daha az verimli olabilir (Bandyopadhyay, 2008).

3.18 Otomatik ve Manuel Sınıflandırma Sistemlerinin Karşılaştırılması

Çizelge 3.1. Otomatik ve Manuel Sınıflandırma Sistemleri

Kriter	Otomatik Sınıflandırma	Manuel Sınıflandırma
Verimlilik	Yüksek, büyük hacimli atıkları işleyebilir	Düşük, daha küçük hacimlerde daha etkili
İş Gücü İhtiyacı	Düşük, makine bazlı	Yüksek, insan iş gücüne dayalı
Maliyet	Yüksek başlangıç maliyeti	Düşük başlangıç maliyeti
Geri Dönüşüm Oranı	Daha yüksek geri kazanım oranı	Daha düşük geri kazanım oranı
Tehlikeli Atık Yönetimi	Otomatik tehlikeli madde ayrıştırma	İnsan güvenliği riski yüksek
Esneklik	Sabit, belirli atık türlerine uygun	Esnek, çeşitli atık türleri için uygun

Çizelge 3.1’de de görüldüğü üzere her iki sistemin de avantajları ve dezavantajları bulunur. Otomatik sınıflandırma, büyük hacimli atıklar ve yüksek geri dönüşüm oranları için idealdir. Ancak manuel sınıflandırma, düşük maliyetli ve esnek bir çözüm sunar ve gelişmekte olan ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tesisin büyüklüğüne, teknolojik altyapısına ve bölgesel koşullara göre hangi sistemin tercih edileceği belirlenir.

Elektronik atıkların (e-atık) geri dönüşümünde değersiz malzeme ayıklama, süreçlerin verimliliğini artırmak ve geri kazanım oranlarını iyileştirmek için kritik bir aşamadır. E-atıkların içinde hem ekonomik değeri olan metaller ve bileşenler, hem de geri

dönüşüm sürecinde kullanılmayan, ekonomik ya da çevresel değeri düşük olan malzemeler bulunur. Değersiz malzeme ayıklama işlemi, bu malzemelerin geri dönüşüm hattından çıkarılmasını ve geri kalan değerli bileşenlerin işlenmesini sağlar. Bu süreç hem otomatik hem de manuel yöntemlerle gerçekleştirilebilir ve geri dönüşüm verimliliğini doğrudan etkiler.

3.19 Değersiz Malzeme Ayıklama Süreçleri

a.Ön Ayırma: Geri dönüşüm tesisine gelen elektronik atıklar, ilk aşamada genellikle bir ön ayırma işlemine tabi tutulur. Bu aşamada, büyük boyutlu ve tehlikeli malzemeler ile değersiz bileşenler ayrılır. Özellikle büyük plastik parçalar, eski kablolar ve cam gibi düşük değerli materyaller manuel ya da makine yardımıyla ayrıştırılır (Cucchiella vd., 2015).

b.Optik Ayırma: Optik ayırma, değersiz malzemeleri tanımlamak ve otomatik olarak ayırmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Optik sensörler, malzemenin rengini ve türünü belirler ve bu bilgiye dayanarak plastik ve cam gibi geri kazanılmayacak malzemeler hattın dışına çıkarılır. Bu teknoloji, özellikle yüksek hacimli geri dönüşüm tesislerinde oldukça etkilidir (Kumar vd., 2017).

c.Elektrostatik Ayırma: E-atıklar içindeki değersiz plastik ve cam gibi malzemeler, elektrostatik ayırma teknikleriyle de işleminden geçirilir. Bu yöntem, malzemelerin yüzey yükü farklarına göre ayrılmasını sağlar. Elektronik devre kartlarından metal içermeyen plastik kısımlar elektrostatik alanlar yardımıyla geri dönüşüm hattından uzaklaştırılır (Zeng vd., 2017).

d.Hava Akımı ile Ayırma: Bu süreçte, atıkların yoğunluk farklarına göre ayrılması için güçlü bir hava akımı kullanılır. Hafif ve değersiz malzemeler, bu hava akımı yardımıyla hattın dışına atılırken, daha ağır ve değerli metaller işleme alınmaya devam eder. Özellikle plastik ve metal karışımlarının ayrılmasında bu yöntem kullanılır (Bandyopadhyay, 2008).

e.Manuel Ayıklama: Küçük ölçekli geri dönüşüm tesislerinde veya gelişmekte olan ülkelerde, değersiz malzemelerin manuel olarak ayıklanması yaygındır. İşçiler, elektronik atıkları elle inceleyerek değerli ve değersiz parçaları ayırır. Bu süreç zaman

alıcıdır ve iş gücüne dayalıdır, ancak bazı karmaşık atıkların ayrıştırılmasında etkili olabilir (Garlapati, 2016).

3.19.1 Değersiz malzeme türleri

a.Plastik: Elektronik atıkların büyük bir kısmı plastik içerir. Plastik parçaların geri dönüştürülmesi genellikle daha az ekonomik değere sahiptir, bu nedenle geri dönüşüm süreçlerinde plastiklerin büyük bir bölümü değersiz malzeme olarak ayıklanır. Ancak bazı yüksek kaliteli plastik türleri geri dönüştürülebilir (Hagelüken, 2006).

b.Cam: Elektronik atıklarda bulunan cam, özellikle eski CRT monitörlerinde ve televizyonlarda yaygındır. Bu tür camlar genellikle kurşun içerdiğinden geri dönüştürülmesi zor ve maliyetlidir. Çoğu zaman değersiz malzeme olarak sınıflandırılır ve ayrıştırılır (Kumar vd., 2017).

c.Kauçuk ve İzolasyon Malzemeleri: Kabloların ve elektronik cihazların dış kısımlarında kullanılan kauçuk ve izolasyon malzemeleri, geri dönüşüm süreçlerinde genellikle değersiz olarak kabul edilir ve işleme alınmadan ayıklanır (Bandyopadhyay, 2008).

d.Diğer Karmaşık Malzemeler: Bazı elektronik atıklar, geri dönüşüm süreçleri için uygun olmayan karmaşık bileşenler içerir. Bu bileşenler, genellikle geri kazanımı zor olan malzemelerden yapılmış karmaşık plastik-metal karışımlarıdır. Bu tür malzemeler de değersiz olarak değerlendirilip ayrılır (Cucchiella vd., 2015).

3.19.1.1 Değersiz malzeme ayıklamanın önemi

Değersiz malzeme ayıklama, geri dönüşüm süreçlerinin daha verimli ve çevreye duyarlı olmasını sağlar. Değerli malzemelerin işleme alınırken, ekonomik değeri olmayan veya çevre için risk teşkil eden materyallerin doğru bir şekilde bertaraf edilmesi çevresel sürdürülebilirlik açısından da büyük önem taşır. Yanlış ayıklama işlemleri, geri dönüşüm tesislerinin verimliliğini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda atık bertarafı sorunlarına da yol açabilir.

Değersiz malzeme ayıklama, geri dönüşüm süreçlerinde verimliliği artırmak ve çevresel etkileri en aza indirmek için hayati bir adımdır. Otomatik sistemler sayesinde

büyük hacimli atıklar hızla ayrıştırılabilirken, manuel sistemler esneklik sağlar ve karmaşık malzemelerin ayıklanmasında etkili olabilir. Her iki yöntemin etkin kullanımı, elektronik atık yönetiminde başarılı sonuçlar elde edilmesine katkı sağlar.

3.19.1.2 Plastik, cam ve diğer değersiz malzemelerin ayıklanması

Elektronik atık geri dönüşümünde, değersiz malzemelerin etkin bir şekilde ayıklanması, geri dönüşüm süreçlerinin verimliliğini artırmak ve değerli malzemeleri daha etkili şekilde geri kazanmak açısından kritik bir adımdır. Elektronik atıkların büyük bir kısmını oluşturan plastik, cam ve diğer değersiz malzemeler, geri dönüştürülmesi ekonomik olmayan veya çevresel zorluklar yaratan bileşenlerdir. Bu malzemeler, genellikle işleme alınmadan önce ayrıştırılır ve farklı bertaraf yöntemlerine yönlendirilir.

Elektronik atıkların önemli bir kısmı plastikten oluşur. Özellikle bilgisayar kasaları, cep telefonu kapakları, televizyon ve monitörlerin dış gövdeleri plastik içerir. Plastik, geri dönüşüm açısından değerlendirildiğinde, elektronik atıklardaki metaller kadar değerli bir geri kazanım malzemesi değildir. Elektronik atıklarda kullanılan plastik türlerinin geri dönüşümü, içerdikleri katkı maddeleri ve kirlenme derecelerine bağlı olarak zor ve pahalı olabilir. Bu nedenle birçok plastik türü değersiz malzeme olarak sınıflandırılır ve geri dönüşüm süreçlerinden ayrılır.

a.Manuel Ayırma: Özellikle düşük kapasiteli geri dönüşüm tesislerinde, plastik parçaların elle ayrılması yaygındır. İşçiler, e-atıkları inceler ve plastik bileşenleri geri dönüşüm hattından ayırır (Kumar vd., 2017).

b.Optik Ayırma: Plastik malzemeler optik sensörler aracılığıyla renklerine ve türlerine göre sınıflandırılabilir. Bu süreçte, geri dönüştürülmeyecek düşük kaliteli plastikler ayrıştırılarak geri dönüşüm sürecinden çıkarılır (Zeng vd., 2017).

c.Hava Akımı ile Ayırma: Yoğunluk farkları kullanılarak hafif plastik malzemeler hava akımı ile geri dönüşüm hattından uzaklaştırılır (Bandyopadhyay, 2008).

3.19.1.3 Cam malzemelerin ayıklanması

Elektronik atıkların içinde bulunan cam, özellikle eski televizyonlar ve CRT monitörlerinde yaygındır. Bu cihazların ekranları ve iç camları, genellikle geri dönüştürülmesi zor olan kurşun içerebilir. Bu nedenle, cam malzemeler sıklıkla değersiz olarak kabul edilir ve geri dönüşüm süreçlerinden ayrılır. Modern LED ve LCD ekranlar daha az cam içerir, ancak yine de geri dönüşüm sürecinde ayrıştırılması gerekmektedir. Ayıklama yöntemleri şunlardır:

a.Kırma ve Ayırma: Cam malzemeler, e-atıklardan ayrıldıktan sonra öğütülerek geri dönüşüm hattından çıkarılır. Kırık cam parçalarının geri dönüştürülmesi, içerdikleri kurşun ve diğer tehlikeli maddeler nedeniyle zordur, bu yüzden genellikle ayıklanarak bertaraf edilir (Cucchiella vd., 2015).

b.Elektrostatik Ayırma: Elektronik devre kartlarındaki cam bileşenler, elektrostatik ayırma yöntemleriyle metal içeren parçalardan ayrılır. Bu süreç, geri dönüştürülemeyecek cam parçalarının ayrıştırılmasını sağlar (Zeng vd., 2017).

3.19.1.4 Diğer değersiz malzemelerin ayıklanması

Elektronik atıklar, plastik ve camın yanı sıra çeşitli diğer değersiz malzemeler de içerir. Bu malzemeler, genellikle ekonomik değeri düşük veya çevresel açıdan tehlikeli bileşenlerdir. Örneğin, kauçuk, kablo izolasyonları, seramikler ve metallerin geri kazanımı sırasında ortaya çıkan atıklar gibi malzemeler değersiz kabul edilir ve geri dönüşüm hattından çıkarılır. Ayıklama yöntemleri şunlardır:

a.Kauçuk ve İzolasyon Malzemeleri: Elektronik cihazların kablolarında kullanılan kauçuk ve izolasyon malzemeleri, geri dönüşüm süreçlerinden genellikle ayrılır. Bu malzemeler manuel veya mekanik yöntemlerle geri dönüşüm hattından çıkarılır (Hagelüken, 2006).

b.Seramik ve Kompozit Malzemeler: Seramik parçalar ve metallerle birleşik yapıda olan kompozit malzemeler, geri dönüştürülmesi zor olduğu için otomatik veya manuel ayırma işlemleriyle geri dönüşüm hattından uzaklaştırılır (Bandyopadhyay, 2008).

3.19.1.5 Değersiz malzemelerin bertarafı

Değersiz olarak sınıflandırılan malzemeler, geri dönüşüm sürecinden çıkarıldıktan sonra genellikle düzenli depolama alanlarına yönlendirilir. Ancak, çevresel etkileri azaltmak amacıyla bazı plastikler enerji geri kazanımı için yakılabilir veya alternatif bertaraf yöntemleri kullanılabilir. Cam ve kurşun içeren materyaller de özel atık depolama sahalarına gönderilerek bertaraf edilir. Plastik, cam ve diğer değersiz malzemelerin ayıklanması, geri dönüşüm süreçlerinin etkinliği açısından büyük önem taşır. Otomatik ve manuel ayırma sistemleri, bu malzemelerin geri dönüşüm sürecine dahil edilmeden önce verimli bir şekilde ayrıştırılmasını sağlar. Bu süreçler, değerli metallerin geri kazanılmasını hızlandırır ve geri dönüşüm tesislerinin verimliliğini artırır. Ayrıca, çevresel zararları en aza indirmek için uygun bertaraf yöntemlerinin seçilmesi, elektronik atık yönetiminde sürdürülebilirliği destekler.

Elektronik atık geri dönüşüm süreçlerinde, değerli metallerin ve diğer geri dönüştürülebilir bileşenlerin ayrıştırılması için çeşitli ekipmanlar kullanılır. Bu ekipmanlar, atıkların etkin bir şekilde işlenmesini ve ayıklanmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Aşağıda, yaygın olarak kullanılan bazı ayıklama ekipmanları ve bunların işlevleri açıklanmaktadır.

a.Manyetik Ayırıcılar

Fonksiyon: Manyetik ayırıcılar, manyetik özellikleri olan metallerin (örneğin, demir, nikel, kobalt) ayrıştırılmasında kullanılır. Elektronik atıklarda bulunan metal parçalarının hızlı bir şekilde ayrılmasını sağlar.

Kullanım Alanları: Genellikle elektrik kabloları, motorlar ve diğer elektronik bileşenlerden ferromanyetik metallerin ayrılması için kullanılır. Bu ekipman, geri dönüşüm hattından çıkan metal parçalarının geri kazanılmasına yardımcı olur (Hagelüken, 2006).

b.Optik Ayırıcılar

Fonksiyon: Optik ayırıcılar, renk ve malzeme türüne göre malzemelerin ayrıştırılmasında kullanılır. Bu ekipman, çeşitli dalga boylarındaki ışık kullanarak malzemelerin özelliklerini belirler ve uygun ayırma işlemlerini gerçekleştirir.

Kullanım Alanları: Plastiklerin, camların ve diğer geri dönüşüm materyallerinin ayrılmasında yaygın olarak kullanılır. Optik ayırıcılar, geri dönüşüm tesislerinde atıkların doğru bir şekilde sınıflandırılmasına katkıda bulunur (Zeng vd., 2017).

c.Hava Tabakası Ayırıcıları

Fonksiyon: Hava tabakası ayırıcıları, yoğunluk farklarına dayanarak malzemeleri ayıran sistemlerdir. Hafif malzemeler (örneğin, plastik) ve ağır malzemeler (örneğin, metal) arasındaki ayrımı sağlar.

Kullanım Alanları: Bu ekipman, özellikle metal ve plastik gibi farklı yoğunluklara sahip malzemelerin ayrıştırılmasında etkilidir. Hava tabakası ayırıcıları, geri dönüşüm sürecinde yüksek verimlilik sağlar (Bandyopadhyay, 2008).

d.Titreşimli Elekler

Fonksiyon: Titreşimli elekler, atıkların boyutlarına göre ayrıştırılmasında kullanılır. Farklı boyutlardaki parçaların elek üzerinden geçmesi sağlanarak, istenmeyen malzemeler ayrılır.

Kullanım Alanları: Elektronik atıkların, plastiklerin ve metal parçaların boyutlarına göre sınıflandırılmasında kullanılır. Bu sistem, geri dönüşüm sürecinin ilk aşamalarında önemli bir rol oynar (Kumar vd., 2017).

e.Elektromanyetik Ayırıcılar

Fonksiyon: Elektromanyetik ayırıcılar, elektronik atıklardaki metal ve diğer bileşenleri ayırmak için elektromanyetik alanlar kullanır. Özellikle değerli metallerin (altın, gümüş gibi) ayrıştırılmasında etkilidir.

Kullanım Alanları: Bu ekipman, özellikle altın ve gümüş içeren devre kartlarının işlenmesinde tercih edilir. Elektromanyetik ayırıcılar, geri dönüşüm tesislerinde önemli bir yere sahiptir (Cucchiella vd., 2015).

f.Ultrasonik Ayırıcılar

Fonksiyon: Ultrasonik ayırıcılar, ultrasonik dalgaların kullanımıyla malzemeleri ayırır. Bu teknoloji, genellikle mikroskopik ölçekteki parçaların ayrılmasında etkilidir.

Kullanım Alanları: Bu ekipman, elektronik devre kartlarındaki ince metal parçalarını ve diğer bileşenleri ayırmak için kullanılabilir. Ultrasonik ayırıcılar, geri dönüşüm süreçlerini iyileştirmek için yenilikçi bir yaklaşım sunar (Bandyopadhyay, 2008).

Ayıklama süreçlerinde kullanılan bu ekipmanlar, elektronik atıkların geri dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır. Doğru ekipmanın seçimi, geri dönüşüm süreçlerinin etkinliğini artırır ve değerli malzemelerin daha iyi bir şekilde geri kazanılmasını sağlar. Bu sayede hem ekonomik faydalar elde edilir hem de çevresel etkiler en aza indirilir.

3.19.1.6 Geri dönüşüme uygun olmayan malzemelerin bertarafı

Geri dönüşüme uygun olmayan malzemelerin bertarafı, elektronik atık yönetiminin önemli bir parçasıdır. Bu süreç, çevresel kirliliği azaltmak ve insan sağlığını korumak için kritik öneme sahiptir.

Elektronik atıklar, içerisinde civa, kurşun, kadmiyum gibi tehlikeli maddeler barındırıyorsa, bu atıklar tehlikeli atık olarak sınıflandırılır. Bu tür atıkların yönetimi, özel yöntemler gerektirir.

Tehlikeli atıklar, genellikle özel bertaraf tesislerinde işlenir. Bu tesisler, tehlikeli maddelerin çevreye zarar vermeden işlenmesini ve yok edilmesini sağlar (Baldé vd., 2015). Ayrıca, bazı ülkelerde bu tür atıkların geri dönüşüm için lisanslı tesislerde işlenmesi zorunludur.

Geri dönüşüme uygun olmayan malzemelerin bertarafı için imha yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu yöntemler, malzemelerin fiziksel olarak yok edilmesini içerir.

İmha yöntemleri arasında yakma (kullanılarak enerji elde edilmesi) ve gömme (çöp sahalarında depolama) bulunmaktadır. Yakma işlemi, organik bileşenlerin yüksek sıcaklıkta yakılarak enerjiye dönüştürülmesi ile gerçekleştirilir. Gömme işlemi ise, atıkların özel olarak belirlenmiş alanlarda toplanması ve kapatılmasıdır (Işık, 2014).

3.20 Düzenli Depolama (Landfill)

Geri dönüşüme uygun olmayan malzemelerin en yaygın bertaraf yöntemlerinden biri düzenli depolamadır. Bu süreç, atıkların belirli alanlarda gömülmesini içerir.

Düzenli depolama alanları, çevresel etkilerin en aza indirilmesi için belirli standartlara uygun olarak inşa edilmelidir. Depolama sahalarının zemin, su ve hava sızıntılarına karşı korunaklı olması gerekmektedir (Kumar vd., 2015). Bu yöntem, özellikle tehlikeli olmayan ama geri dönüşüme uygun olmayan atıklar için kullanılmaktadır.

3.21 Yeniden Kullanım ve İyileştirme

Bazı geri dönüşüme uygun olmayan malzemeler, yeniden kullanım veya iyileştirme yoluyla bertaraf edilebilir. Bu yaklaşım, kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar. Örneğin, eski elektronik cihazlardan çıkarılan parçalar, yeni ürünlerde kullanılabilir. Ayrıca, tamir edilerek veya yeniden yapılandırılarak tekrar piyasaya sürülebilirler (Hazar vd., 2020). Bu yöntem, atık miktarını azaltır ve ekonomik fayda sağlar.

3.22 Eğitim ve Farkındalık

Geri dönüşüme uygun olmayan malzemelerin bertarafı konusunda toplumda farkındalık yaratmak önemlidir. Tüketicilerin doğru bilgiye sahip olmaları, bu sürecin etkinliğini artırır. Eğitim programları ve bilgilendirme kampanyaları, bireylerin geri dönüşüm ve bertaraf süreçleri hakkında bilinçlenmelerini sağlar. Bu tür girişimler, geri dönüşüme uygun olmayan malzemelerin doğru bir şekilde bertaraf edilmesini destekler (Chen vd., 2016).

Geri dönüşüme uygun olmayan malzemelerin bertarafı, çevresel sürdürülebilirlik ve insan sağlığı açısından hayati öneme sahiptir. Tehlikeli atık yönetimi, imha yöntemleri, düzenli depolama ve yeniden kullanım gibi çeşitli yöntemlerin bir arada kullanılması, bu süreçlerin etkinliğini artırır. Ayrıca, toplumda farkındalığın artırılması, bu sürecin başarısını destekler.

3.22.1 Değerli metal geri kazanımı

Elektronik atıklar, içerdikleri değerli metaller nedeniyle geri kazanım sürecinde önemli bir kaynak teşkil eder. Altın, gümüş, bakır, paladyum ve platin gibi metaller, elektronik bileşenlerde yaygın olarak bulunur ve bu metallerin geri kazanımı hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik kazanç açısından büyük bir fırsat sunar. Değerli metal geri kazanım süreci, genellikle üç ana aşamadan oluşur: bileşenlerin ayrıştırılması, kimyasal geri kazanım süreçleri ve termal geri kazanım süreçleri.

3.22.1.1 Değerli metal içeren bileşenlerin ayrıştırılması

Elektronik atıklardaki değerli metallerin geri kazanım sürecinin ilk adımı, bu metallerin yoğun olarak bulunduğu bileşenlerin ayrıştırılmasıdır. Bu bileşenler arasında devre kartları, işlemciler ve konektörler gibi parçalar öne çıkar. Her bir bileşenin ayrıştırılması, geri kazanım sürecinin etkinliği için kritik öneme sahiptir.

a.Devre Kartları: Devre kartları, elektronik atıklar içindeki en önemli bileşenlerden biridir. Bu kartlarda genellikle altın ve bakır gibi değerli metaller bulunur. Devre kartlarının ayrıştırılması, özel makinelerle parçalara ayrılma ve ardından manuel veya otomatik olarak değerli metal içeren parçaların seçilmesi ile gerçekleştirilir (Wang vd., 2013).

Ayrıştırma işlemlerinde mekanik ayrıştırmada ilk olarak, elektronik atıklar fiziksel olarak parçalanır. Bu işlem, özel öğütme makineleri ile yapılır. Kartlar, daha küçük parçalara ayrılarak, değerli metal içeren kısımlar kolayca seçilebilir hale gelir (Wang vd., 2013).

Manuel veya otomatik seçimde öğütülen malzeme daha sonra, manuel veya otomatik sistemler aracılığıyla değerli metallerin yoğun olduğu parçaların ayrıştırılması için işlenir. Manyetik ayırıcılar ve optik ayırıcılar gibi teknolojiler, altın veya gümüş içeren bileşenlerin tespit edilmesine yardımcı olur (Khan vd., 2020).

b.İşlemciler: İşlemciler, yüksek değerli metallerin yoğun olduğu diğer bileşenlerdir. Bu parçalar dikkatlice çıkarılır ve geri kazanım sürecine hazırlanır (Khan vd., 2020).

Ayrıştırma sürecinde işlemciler, genellikle devre kartlarından fiziksel olarak çıkarılır. Bu işlem, dikkatli bir şekilde yapılmalı, işlemcilerin hasar görmemesi sağlanmalıdır (Hagelüken ve Corti, 2010).

Çıkarılan işlemciler, değerli metal içeriği açısından değerlendirilir ve geri kazanım sürecine uygun olup olmadığına karar verilir. Bu değerlendirme, işlemcilerin yapısına ve metal içeriğine bağlı olarak değişebilir.

c.Konektörler: Konektörler, elektriksel bağlantı sağlayan bileşenlerdir ve içinde değerli metaller, genellikle gümüş ve altın bulundurlar.

Konektörler, diğer bileşenlerden ayrı olarak toplanır ve ayrıştırılır. Bu bileşenler, çoğu zaman yüksek kaliteli metal içeriği sunar, bu nedenle özel dikkat gerektirir (Wang vd., 2013).

Ayrıştırılan konektörler, kimyasal geri kazanım süreçlerine uygun hale getirilmek üzere hazırlanır. Bu aşamada, konektörlerin mekanik olarak çıkarılması veya asitleme gibi işlemlerle metal içeriklerinin çözeltiye geçişi sağlanabilir.

Değerli metal içeren bileşenlerin ayrıştırılması, geri dönüşüm sürecinin ilk ve en kritik aşamalarından biridir. Doğru yöntemler kullanılarak yapılan ayrıştırma işlemleri, metal geri kazanımının etkinliğini artırır ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunur. Elektronik atıkların yönetimi ve geri dönüşümü, bu süreçlerin dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmesi ile daha verimli hale gelebilir.

3.22.2 Kimyasal geri kazanım süreçleri

Elektronik atıklardan değerli metallerin geri kazanımı için kullanılan kimyasal geri kazanım süreçleri, metallerin çözünmesi ve ayrıştırılması amacıyla çeşitli kimyasal yöntemlerin uygulanmasını içerir. Bu yöntemler arasında asitleme ve elektroliz gibi işlemler öne çıkar.

a.Asitleme (Acid Leaching): Değerli metaller, genellikle sülfürik veya nitrik asit kullanılarak ayrılır. Asit, metal bileşenlerini çözerek, metal tuzlarının oluşumunu sağlar. Bu işlem, yüksek geri kazanım oranları ile etkili bir yöntemdir (Veit vd., 2017). Asitleme, elektronik atıklardan değerli metallerin çözündürülmesi için yaygın olarak

kullanılan bir yöntemdir. Bu süreç, çeşitli asitlerin kullanılmasıyla gerçekleştirilir ve aşağıdaki adımları içerir:

Elektronik atıklar, önce mekanik yöntemlerle parçalanır ve ince bir toz haline getirilir. Bu, asitlemenin etkinliğini artırır (Wang vd., 2013).

Parçalanmış malzeme, genellikle sülfürik asit, nitrik asit veya hidroklorik asit gibi asitlerle karıştırılır. Bu asitler, metal oksitlerini çözerek metal iyonlarını çözeltiye geçirir. Örneğin, altın ve gümüş gibi değerli metaller, sülfürik asit ile kolayca çözündürülür (Hagelüken ve Corti, 2010).

Asitleme işleminden sonra, çözelti içindeki metal iyonları ayrıştırılır. Bu aşamada, metallerin çözeltilerden elde edilmesi için çeşitli işlemler uygulanır.

b.Elektroliz (Electrolysis): Elde edilen metal çözeltileri, elektroliz süreci ile saf metallere dönüştürülür. Elektrotlar arasında uygulanan elektrik akımı, metalleri çözelti içinden katmanlaşarak çıkarmaya yardımcı olur (Chatterjee vd., 2016). Elektroliz, asitleme ile elde edilen metal çözeltilerinin saf metale dönüştürülmesi için kullanılan bir başka kimyasal geri kazanım yöntemidir. Bu süreç, elektrik akımının kullanılması ile gerçekleştirilir ve aşamaları şu şekildedir:

Asitleme işleminden sonra elde edilen metal iyonları içeren çözelti, elektroliz işlemi için uygun hale getirilir. Bu çözeltinin pH değeri ve bileşimi, elektroliz verimliliğini etkileyebilir (Zhang vd., 2015).

Elektroliz hücresi içinde, anot ve katot olarak adlandırılan iki elektrot yer alır. Çözelti, bu elektrotlar arasına yerleştirilir ve elektrik akımı uygulanır. Bu işlem sırasında, metal iyonları katotta toplanır ve saf metal formunda çökelir (Sinha vd., 2014).

Elektroliz işlemi sonunda, katotta biriken metal, fiziksel olarak toplanır. Bu metal, daha sonra daha fazla işleme tabi tutulabilir veya doğrudan satışa sunulabilir.

Kimyasal geri kazanım süreçleri, elektronik atıklardan değerli metallerin etkin bir şekilde geri kazanılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Asitleme ve elektroliz gibi yöntemler, bu süreçlerin temelini oluşturur ve geri dönüşüm endüstrisinin

sürdürülebilirliğine katkıda bulunur. Bu süreçlerin doğru bir şekilde uygulanması hem ekonomik faydalar sağlar hem de çevresel etkiyi azaltır.

3.22.3 Termal geri kazanım süreçleri

Termal geri kazanım, değerli metallerin yüksek sıcaklıkta işlenmesi yoluyla elde edilmesini sağlar. Termal geri kazanım süreçleri, elektronik atıklardan değerli metallerin geri kazanımında kullanılan yüksek sıcaklıkta işlem yapma yöntemleridir. Bu yöntemler, genellikle pirometalurji ve termal dönüştürme süreçlerini içerir. Termal geri kazanım, metalin eritilmesi, ayrıştırılması ve yeniden kullanıma kazandırılması amacıyla gerçekleştirilir.

a.Pirometalurji (Pyrometallurgy): Pirometalurji, yüksek sıcaklıklarda metal oksitlerinin veya bileşiklerinin eritilmesi ve ayrıştırılması için kullanılan bir tekniktir. Bu süreçte, elektronik atıklar yüksek sıcaklıklarda eritilir. Metaller, bu işlem sonucunda sıvı hale geçer ve ayrıştırılır. Pirometalurji, özellikle büyük miktarlardaki elektronik atıkların işlenmesinde kullanılır ve yüksek verimlilik sağlar (Meyer vd., 2017).

Elektronik atıklar, mekanik yöntemlerle parçalara ayrılır ve daha sonra uygun boyutlarda toz haline getirilir. Bu, metal geri kazanım verimliliğini artırır.

Hazırlanan toz, yüksek sıcaklık fırınlarına (örneğin, indüksiyon ocakları veya yüksek fırınlar) yerleştirilir. Bu aşamada, malzeme 1200-1600 °C gibi yüksek sıcaklıklara ısıtılır. Metal bileşenler, bu sıcaklıkta sıvı hale gelirken, diğer bileşenler gaz veya cüruf formuna geçer (Mao vd., 2013).

Eritme işleminden sonra, oluşan sıvı metal ve cüruf ayrı birimlerde toplanır. Değerli metaller, sıvı metal fazında bulunurken, değersiz bileşenler cüruf formunda ayrılır. Bu süreçte, değerli metallerin saflığı artırılır (Xiao vd., 2017).

b.Termal Dönüştürme: Termal dönüştürme, elektronik atıkların yakılmasıyla enerji üretme ve geri kazanım sağlama işlemidir.

Elektronik atıklar, özel yakma tesislerinde yüksek sıcaklıklarda yakılır. Bu işlem, organik bileşenlerin parçalanarak enerjiye dönüşmesini sağlar. Yanma sırasında ortaya çıkan ısı, elektrik enerjisi üretmekte kullanılabilir (Cui ve Zhang, 2008).

Yakma işlemi sonrası geriye kalan kalıntılar, değersiz malzemeler ve metal içeren cürufklar olarak ayrılır. Bu kalıntılar, pirometalurji veya diğer geri kazanım yöntemleri ile işlenebilir.

c.Gazların Kontrolü: Termal dönüştürme sırasında ortaya çıkan gazların çevreye zararlı etkilerinin önlenmesi için, emisyon kontrol sistemleri kullanılır. Bu sistemler, zararlı gazların filtrelenmesini ve ortamda temizlenmesini sağlar (Tsai vd., 2016).

Termal geri kazanım süreçleri, elektronik atıklardan değerli metallerin ve enerjinin geri kazanımında önemli bir rol oynamaktadır. Pirometalurji ve termal dönüştürme, bu süreçlerin temel bileşenleridir ve çevresel etkileri azaltarak sürdürülebilir bir geri dönüşüm yaklaşımını destekler.

Değerli metal geri kazanımı, elektronik atıkların çevresel etkilerini azaltmak ve ekonomik fayda sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bileşenlerin ayrıştırılması, kimyasal ve termal geri kazanım süreçleri, değerli metallerin etkin bir şekilde elde edilmesini sağlayarak sürdürülebilir bir geri dönüşüm süreci oluşturur. Bu yöntemler, atık yönetimi stratejilerinin önemli bir parçasını oluşturur.

3.22.4 Plastik ve cam geri kazanımı

Elektronik atıklar, günümüz teknolojisinde önemli bir sorun haline gelmiş ve bu atıkların geri kazanımı hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik fayda açısından büyük bir öneme sahiptir. Elektronik atıklardan plastik ve cam geri kazanım süreçleri, atık yönetiminin önemli bir parçasını oluşturur. Bu süreçler, ayrıştırma, geri dönüşüm ve yeniden kullanım aşamalarını içerir.

3.22.4.1 Plastik geri kazanımı

Plastik malzemeler, elektronik cihazların büyük bir kısmını oluşturur. Geri kazanım sürecinde plastiklerin ayrıştırılması ve yeniden işlenmesi şu aşamalardan oluşur:

a.Ayrıştırma: Elektronik atıklar, plastik bileşenlerin ayrıştırılması amacıyla çeşitli mekanik yöntemlerle işlenir. Atıklar, önce genel bir ayrıştırma sürecine tabi tutulur; bu süreçte manyetik ayırıcılar, titreşimli elekler ve optik ayırıcılar kullanılır (Kumar ve Singh, 2018). Bu aşamada, farklı plastik türleri (örneğin, ABS, polikarbonat) belirlenir.

b.Temizlik: Ayrıştırılan plastikler, kir ve yabancı maddelerden arındırılır. Bu işlem, geri dönüştürülecek malzemenin kalitesini artırır. Temizlik işlemi, su ve deterjan kullanarak veya kimyasal yöntemlerle yapılabilir (Bünger ve Buehler, 2020).

c.Kırma ve Granülleme: Temizlenmiş plastikler, küçük parçalara (granüllere) kırılır. Bu granüller, yeni plastik ürünlerin üretiminde kullanılabilir. Ayrıca, bu aşama sırasında plastiklerin türleri belirlenir ve uygun geri dönüşüm yöntemleri uygulanır (Bünger ve Buehler, 2020).

d.Geri Dönüşüm: Plastik granüller, yeni ürünlerin imalatında kullanılmak üzere işlenir. Bazı plastik türleri, kimyasal geri dönüşüm yöntemleriyle (örneğin, piroliz) işlenerek enerjiye dönüştürülebilir (Kumar ve Singh, 2018).

3.22.4.2 Cam geri kazanımı

Cam, elektronik atıklarda bulunan diğer önemli bir malzemedir. Geri kazanım süreci şu adımları içerir:

a.Ayrıştırma: Cam bileşenler, elektronik atıkların toplanması aşamasında mekanik yöntemlerle ayrıştırılır. Cam, genellikle diğer malzemelerden manyetik ayırıcılar kullanılarak ayrılır. Bu aşama, camın temiz ve sağlam bir şekilde toplanması için kritik öneme sahiptir (Pérez-Bernabeu vd., 2016).

b.Kırma: Ayrıştırılan camlar, özel makinelerle parçalanır. Bu işlem, camın boyutunu küçültür ve geri dönüşüm sürecine hazır hale getirir. Cam kırma makineleri, camın düzgün bir şekilde kırılmasını sağlar.

c.Temizlik ve Ayrıştırma: Kırılmış cam parçaları, yabancı maddelerden arındırılır. Camın saflığı, geri dönüşüm sürecinde kaliteli cam ürünleri elde etmek için kritik bir faktördür. Cam parçaları, su ve hava akımı kullanılarak temizlenebilir (Verdugo vd., 2019).

d.Eritme ve Yeniden Şekillendirme: Temizlenmiş cam parçaları, eritilir ve yeni cam ürünlerin üretilmesinde kullanılır. Cam geri dönüşüm oranları, enerji tasarrufu sağlar ve çevresel etkileri azaltır (Verdugo vd., 2019). Eritme süreci, yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilir ve bu, camın yeni ürünlerde kullanılabilir olmasını sağlar (Pérez-Bernabeu vd., 2016).

Plastik ve cam geri kazanım süreçleri, elektronik atıkların yönetimi açısından önemli bir yer tutar. Bu süreçler, çevresel etkileri azaltırken, aynı zamanda ekonomik değer de yaratmaktadır. Elektronik atıklardan geri kazanılan plastik ve cam, yeni ürünlerin üretiminde kullanılmakta ve doğal kaynakların korunmasına katkı sağlamaktadır.

3.23 Elektronik Atıkların İçinde Bulunan Toksik Maddelerin Kontrolü ve Bertarafı

Elektronik atıklarda bulunan toksik maddelerin kontrolü, çevresel sürdürülebilirlik ve insan sağlığını koruma açısından kritik bir öneme sahiptir. Elektronik atıklar, civa, kurşun, kadmiyum, bromlu alev önleyiciler (BFR) gibi çeşitli zararlı bileşenler içerebilir. Bu maddelerin yönetimi, atık işleme süreçlerinin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi ve geri dönüşüm sürecinin etkili bir şekilde uygulanması için gereklidir. Toksik maddelerin kontrolü ve bertarafı, çevresel sürdürülebilirlik ve kamu sağlığının korunması için hayati bir öneme sahiptir.

3.23.1 Toksik maddelerin tanımlanması ve izlenmesi

Elektronik cihazların üretiminde kullanılan malzemelerin içeriğinin bilinmesi, toksik maddelerin belirlenmesinde önemli bir adımdır. Üreticilerin malzeme güvenliği veri sayfaları (MSDS) ve ürün etiketleri, hangi toksik maddelerin bulunduğunu gösterir (Zhang vd., 2020).

Toksik maddelerin varlığını tespit etmek için çeşitli laboratuvar analizleri yapılır. X-ışını floresan spektroskopisi (XRF), atomik absorpsiyon spektrometrisi (AAS) gibi yöntemler, bu maddelerin konsantrasyonunu ölçmek için kullanılır (Baldé vd., 2015).

Elektronik atıkların işlenmesi sırasında toksik maddelerin içeren bileşenlerin ayrıştırılması gerekmektedir. Bu işlem, manuel ve otomatik sistemlerle gerçekleştirilebilir. Manyetik ayırıcılar, optik ayırıcılar gibi teknolojiler, değerli

metallerin geri kazanılmasının yanı sıra, toksik bileşenlerin ayrıştırılmasına da yardımcı olur (Pérez-Bernabeu vd., 2016). Ayrıştırılan toksik maddelerin, çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bu maddeler, özel tesislerde depolanmalı ve gerektiğinde uygun yöntemlerle yok edilmelidir. Örneğin, civa içeren bileşenlerin, tehlikeli atık olarak yönetilmesi gerekir.

Elektronik atık işleme tesislerinde çalışanların, toksik maddelerin tehlikeleri ve yönetim yöntemleri konusunda eğitilmesi önemlidir. Bu eğitim, atıkların güvenli bir şekilde işlenmesini sağlamak ve çalışanların sağlığını korumak için gereklidir (Lundgren, 2012). Elektronik atıkların yönetimi konusunda toplumda farkındalık yaratmak, geri dönüşüm süreçlerinin etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi için önemlidir. Tüketicilere, elektronik cihazların doğru bir şekilde atılması ve geri dönüşüm süreçlerine katılım konusunda bilgi verilmelidir (Kumar ve Singh, 2018).

Toksik maddelerin yönetimi için ulusal ve uluslararası düzeyde yasal düzenlemeler bulunmaktadır. Örneğin, Avrupa Birliği'nin WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) ve RoHS (Restriction of Hazardous Substances) direktifleri, toksik maddelerin kontrolü konusunda standartlar belirler (European Commission, 2012). Elektronik atık işleme tesislerinin, bu yasal düzenlemelere uyması gerekmektedir. Tesisler, toksik maddelerin yönetimi ve bertarafı konusunda belirlenen standartları izlemeli ve denetim süreçlerine tabi tutulmalıdır (Zhang vd., 2020). Toksik madde kontrolü, elektronik atıkların işlenmesinde kritik bir aşamadır. Toksik maddelerin tanımlanması, ayrıştırılması, bertaraf edilmesi ve bu konuda eğitim verilmesi, çevresel sürdürülebilirliği artırırken insan sağlığını koruma açısından da önemlidir.

Tehlikeli atıklar, insan sağlığına ve çevreye zarar verebilecek bileşenler içeren atık türleridir. Elektronik atıklar, kimyasal atıklar, tıbbi atıklar gibi farklı türleri vardır ve bu atıkların güvenli bir şekilde işlenmesi, ciddi sağlık ve çevresel sorunların önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Tehlikeli atıklar, içerdikleri bileşenlerin doğası nedeniyle zararlı olabilecek atıklardır. Bu atıklar genellikle aşağıdaki kriterlere göre sınıflandırılır:

a. Toksisite: İnsan sağlığına zarar verebilecek veya çevre kirliliğine neden olabilecek maddeler içerir.

b.Patlayıcılık: Yangın veya patlama riski taşıyan bileşenler barındırır.

c.Aşındırıcılık: Metal, deri veya diğer maddeleri aşındırabilen kimyasallar içerir.

d.Reaktiflik: Diğer maddelerle tehlikeli tepkimeler verebilen bileşenler içerir (Kumar ve Singh, 2018).

Tehlikeli atıkların güvenli bir şekilde işlenmesi için aşağıdaki adımlar izlenmelidir:

Tehlikeli atıkların ayrıştırılması, geri dönüşüm ve bertaraf süreçlerinde ilk adımdır. Bu işlem, atıkların türlerine göre ayrılmasını ve uygun işleme yöntemlerinin belirlenmesini sağlar. Tehlikeli atıkların toplanması ve taşınması, özel ekipman ve prosedürler gerektirir. Taşımacılık sırasında, atıkların sızdırmaz kaplarda muhafaza edilmesi ve güvenli yollarla taşınması önemlidir (Zhang vd., 2020).

Tehlikeli atıkların fiziksel olarak işlenmesi, atıkların boyutlarının küçültülmesi, ayrıştırılması ve güvenli bir şekilde depolanmasını içerir. Örneğin, parçalama ve sıkıştırma işlemleri bu kategoride yer alır (Pérez-Bernabeu vd., 2016).

Tehlikeli atıkların kimyasal yöntemlerle işlenmesi, toksik maddelerin güvenli bir şekilde nötralize edilmesini sağlar. Bu işlem, genellikle özel kimyasallar kullanılarak gerçekleştirilir (Lundgren, 2012). Termal işlemler, tehlikeli atıkların yüksek sıcaklıklarda yakılması veya eritilmesi yoluyla bertaraf edilmesini sağlar. Bu yöntem, zararlı maddelerin yok edilmesi ve enerji geri kazanımı sağlamak için kullanılabilir (Baldé vd., 2015).

Tehlikeli atıkların işlenmesi ve bertarafı, uluslararası ve ulusal düzeyde düzenlemeler ve standartlara tabidir. Bu düzenlemeler, çevreyi korumak ve insan sağlığını tehdit eden durumları önlemek amacıyla oluşturulmuştur (European Commission, 2012). Tehlikeli atıklar, geçici veya kalıcı depolama tesislerinde saklanmalıdır. Bu tesisler, atıkların güvenli bir şekilde muhafaza edilmesini sağlamak için özel mühendislik çözümleri ile donatılmalıdır (Kumar ve Singh, 2018).

Tehlikeli atıklarla çalışan personelin eğitimi, güvenli işleme süreçlerinin uygulanması açısından kritik öneme sahiptir. Eğitim programları, tehlikeli atıkların yönetimi, risk değerlendirmesi ve acil durum planları hakkında bilgi vermelidir. Tehlikeli atıkların

güvenli bir şekilde işlenmesi konusunda toplumda farkındalık oluşturmak, atık yönetimi süreçlerinin etkinliğini artırır. Tüketicilere, tehlikeli atıkların doğru bir şekilde atılması ve geri dönüşüm süreçlerine katılım konusunda bilgi verilmelidir (Lundgren, 2012).

Tehlikeli atıkların güvenli bir şekilde işlenmesi, çevre koruma ve halk sağlığının korunması açısından hayati öneme sahiptir. Ayırıştırma, toplama, taşıma ve bertaraf süreçlerinin titizlikle uygulanması, bu atıkların zararlı etkilerinin azaltılmasına yardımcı olur. Eğitim ve farkındalık artırma çalışmaları, başarılı bir atık yönetim sisteminin temelini oluşturur.

Atık gazlar ve sıvılar, sanayi süreçlerinden, evsel kullanımlardan ve diğer kaynaklardan kaynaklanan önemli çevresel sorunlardır. Bu atıkların arıtılması hem insan sağlığını korumak hem de çevre kirliliğini önlemek için kritik bir adımdır. Bu bölümde, atık gaz ve sıvıların arıtılması süreçleri detaylandırılacaktır. Atık gazlar, sanayi tesisleri, araçlar ve diğer kaynaklardan çıkan kirleticileri içerir. Bu gazların arıtılması, çeşitli teknikler kullanılarak gerçekleştirilir:

a.Filtrasyon Yöntemleri

Partikül Filtreleri: Toz, duman ve diğer katı parçacıkları yakalamak için kullanılır. Genellikle sanayi bacalarında bulunan partikül filtreleri, gaz akışındaki katı maddeleri tutar (Pérez-Bernabeu vd., 2016).

b.Kimyasal Arıtma

Gaz Absorpsiyonu: Gazların, sıvı bir çözeltide çözünebilme özelliğinden yararlanarak kirleticilerin uzaklaştırılmasıdır. Örneğin, sülfür dioksit (SO₂) gazı, alkaline bir çözeltiyle absorbe edilebilir (Zhang vd., 2020).

c.Katalitik İndirgeme

Katalitik Dönüşüm: Zararlı gazların, katalizör yardımıyla daha az zararlı bileşenlere dönüşmesi sağlanır. Özellikle otomotiv sektöründe, egzoz gazlarının arıtılmasında yaygın olarak kullanılır.

Atık sıvılar, endüstriyel atıklar, evsel atık su ve diğer sıvı atıkları içerir. Bu atıkların arıtılması, genellikle aşağıdaki yöntemlerle gerçekleştirilir:

a.Fiziksel Arıtma

Sedimentasyon: Sıvı içindeki katı maddelerin yerçekimi etkisiyle dibe çökmesi sağlanır. Bu işlem, genellikle ön arıtma aşamasında kullanılır (Baldé vd., 2015).

b.Kimyasal Arıtma

Koagülasyon ve Flokülasyon: Su içindeki kolloidal maddelerin bir araya getirilerek daha büyük parçacıklar haline getirilmesi sürecidir. Bu işlem, suyun bulandırıcılığını azaltmak için uygulanır (Kumar ve Singh, 2018).

c.Biyolojik Arıtma

Aktif Çamur Yöntemi: Bu yöntemde, mikroorganizmalar kullanılarak organik maddelerin biyolojik olarak parçalanması sağlanır. Bu süreç, atık suyun arıtılmasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Lundgren, 2012).

Atık gaz ve sıvıların arıtılması, aşağıdaki nedenlerle son derece önemlidir:

a.Çevresel Koruma: Arıtma süreçleri, çevresel kirliliği azaltarak ekosistemlerin korunmasına yardımcı olur (Pérez-Bernabeu vd., 2016).

b.İnsan Sağlığı: Zararlı gazların ve sıvıların arıtılması, insan sağlığını korumak için kritik öneme sahiptir. Bu, solunum yolu hastalıkları ve diğer sağlık sorunlarının önlenmesine katkıda bulunur (Zhang vd., 2020).

c.Yeniden Kullanım: Arıtılan sıvılar, çeşitli endüstriyel ve tarımsal uygulamalarda yeniden kullanılabilir, böylece su tasarrufu sağlanır (Baldé vd., 2015).

Atık gaz ve sıvıların arıtılması, çevresel sürdürülebilirlik ve halk sağlığı açısından hayati öneme sahiptir. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri, atıkların etkin bir şekilde yönetilmesini sağlar. Gelişen teknolojilerle birlikte bu arıtma süreçlerinin etkinliği ve verimliliği artırılmakta, böylece çevresel etkiler en aza indirilmektedir.

Elektronik atıkların yönetiminde, geri kazanım süreçlerinin enerji üretimi ile entegrasyonu önemli bir yer tutmaktadır. Bu süreç hem çevresel etkileri azaltmak hem de kaynakların verimli kullanılmasını sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Bu bölümde, enerji üretimi ve geri kazanımı konuları ele alınacaktır. Elektronik atıklardan enerji üretimi, çeşitli yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yöntemler şunları içerir:

a.Yakma: Elektronik atıklar, yüksek sıcaklıklarda yakılarak enerji üretilir. Bu süreçte, atıkların enerji içeriği değerlendirilirken, ortaya çıkan ısı enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür. Yakma işlemi sırasında, toksik gazların oluşumunu önlemek için atık gaz arıtma sistemleri kullanılır (Zhang vd., 2021).

b.Gazlaştırma Süreci: Elektronik atıklar, oksijen kısıtlaması altında yüksek sıcaklıklarda işlenerek sentetik gaz (syngas) üretilir. Elde edilen bu gaz, enerji üretiminde kullanılabilir. Gazlaştırma işlemi, atıkların enerji verimliliğini artırır ve gazın kullanımında esneklik sağlar (Müller vd., 2020).

c.Biyokütle Kullanımı: Elektronik atıklarda bulunan organik bileşenler, mikroorganizmalar tarafından parçalanarak biyogaz üretimi için kullanılabilir. Bu biyogaz, elektrik ve ısı enerjisi üretimi için kullanılabilir (Li vd., 2019).

Enerji üretimi ile birlikte, elektronik atıkların geri kazanımı da önemlidir. Bu süreç, değerli metallerin ve diğer malzemelerin geri kazanımını içerir:

a.Kimyasal ve Fiziksel Yöntemler: Elektronik atıklardan altın, gümüş, bakır gibi değerli metallerin geri kazanımı için çeşitli kimyasal ve fiziksel yöntemler kullanılır. Bu süreçler, enerji üretimiyle entegre edildiğinde hem ekonomik hem de çevresel açıdan fayda sağlar (Kumar vd., 2018).

b.Plastik ve Cam Geri Kazanımı: Elektronik atıklar içindeki plastik ve cam, geri kazanım süreçleri ile yeniden kullanılabilir hale getirilir. Bu malzemeler, yeni ürünlerin üretiminde kullanılabilir ve böylece enerji tasarrufu sağlanır (Baldé vd., 2015).

Enerji üretimi ve geri kazanımı, aşağıdaki avantajları sunar:

a.Kaynak Tasarrufu: Elektronik atıklardan enerji ve malzeme geri kazanımı, doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar (Müller vd., 2020).

b.Çevresel Etki Azaltma: Atıkların enerji üretiminde kullanılması, atık depolama ihtiyacını azaltır ve çevre kirliliğini önler (Li vd., 2019).

c.Ekonomik Faydalar: Geri kazanım süreçleri, ekonomik değer yaratırken, atık yönetim maliyetlerini de azaltır (Zhang vd., 2021).

Elektronik atıklardan enerji üretimi ve geri kazanımı, sürdürülebilir bir atık yönetim stratejisi oluşturmak için kritik öneme sahiptir. Termal dönüşüm, gazlaştırma ve biyokütle kullanımı gibi yöntemler hem enerji üretimini artırmakta hem de geri kazanım süreçleriyle entegre çalışmaktadır. Bu süreçler, çevresel etkilerin azaltılmasına ve kaynakların verimli kullanılmasına katkıda bulunmaktadır.

Elektronik atıkların yönetiminde, enerji geri kazanımı süreçleri önemli bir rol oynamaktadır. Bu süreçler hem çevresel etkiyi azaltmak hem de kaynak verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Aşağıda, elektronik atıklardan enerji geri kazanımını sağlamak için kullanılan başlıca yöntemler açıklanmaktadır.

a.Yakma: Elektronik atıklar, yüksek sıcaklıkta yakılarak enerji üretilir. Yakma işlemi sırasında atıkların içindeki organik bileşenler yanar ve bu yanma sonucunda ortaya çıkan ısı enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür. Ayrıca, yakma sırasında ortaya çıkan zararlı gazların kontrolü için gaz arıtma sistemleri kullanılır (Zhang vd., 2021).

b.Piroliz: Elektronik atıkların oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıkta parçalanması ile gerçekleşir. Bu işlem sonucunda, sıvı, gaz ve katı ürünler elde edilir. Piroliz süreci, atıkların enerji değerini artırırken, toksik bileşenlerin azaltılmasına da katkı sağlar (Müller vd., 2020).

c.Gazlaştırma: Gazlaştırma, elektronik atıkların yüksek sıcaklık ve düşük oksijen ortamında işlenmesi ile gerçekleştirilir. Bu işlem, atıkların gaz haline dönüşmesini sağlar ve elde edilen sentetik gaz (syngas) enerji üretiminde kullanılabilir.

Gazlaştırma, yüksek verimlilikte enerji üretimi sağlamanın yanı sıra, atıkların hacmini de önemli ölçüde azaltır (Li vd., 2019).

Elektronik atıkların içinde bulunan organik bileşenler, mikroorganizmalar tarafından parçalanarak biyogaz üretimi için kullanılabilir. Biyogaz, elektrik ve ısı enerjisi üretiminde değerlendirilebilir. Bu süreç, atıkların çevre dostu bir şekilde enerjiye dönüştürülmesini sağlar (Kumar vd., 2018).

Elektronik atıklardan elde edilen enerji, yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edilebilir. Bu sayede, atıklardan elde edilen enerji, güneş veya rüzgâr enerjisi ile desteklenerek sürdürülebilir bir enerji üretimi sağlanabilir. Bu entegrasyon, enerji sisteminin daha esnek ve sürdürülebilir olmasına yardımcı olur (Baldé vd., 2015).

Elektronik atıkların enerji geri kazanımı, çevresel sürdürülebilirliği artırmak ve ekonomik faydalar sağlamak için kritik öneme sahiptir. Termal dönüşüm, gazlaştırma ve biyokütle enerjisi gibi yöntemler, atıklardan enerji üretimi sağlarken, değerli malzemelerin geri kazanımına da katkıda bulunur. Bu süreçlerin etkin bir şekilde uygulanması, atık yönetim sistemlerinin verimliliğini artıracak ve kaynakların daha sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır.

Elektronik atıkların yönetimi ve geri dönüşüm süreçleri, sürekli gelişen teknolojik inovasyonlar sayesinde daha verimli hale gelmektedir. Bu inovasyonlar, geri kazanım süreçlerinin etkinliğini artırmak, maliyetleri düşürmek ve çevresel etkileri azaltmak için kritik öneme sahiptir. Aşağıda, elektronik atık yönetimi alanındaki önemli teknolojik inovasyonlar ve iyileştirmeler açıklanmaktadır.

Elektronik atıkların ayrıştırma ve geri dönüşüm süreçlerinde otomasyon ve robot teknolojileri kullanımı artmaktadır. Robotik sistemler, manuel iş gücünün yerini alarak daha hızlı ve güvenilir bir ayıklama süreci sağlar. Özellikle, malzeme ayırma, sınıflandırma ve işleme aşamalarında robotlar kullanılarak verimlilik artırılmakta ve insan hatası azaltılmaktadır (Katz vd., 2020).

Manyetik ayırıcılar, optik ayırıcılar ve elektrostatik ayırıcılar gibi ileri düzey ayırma teknolojileri, elektronik atıklardan değerli metallerin ve malzemelerin daha etkili bir şekilde ayrıştırılmasını sağlar. Bu teknolojiler, malzeme özelliklerini kullanarak daha yüksek geri dönüşüm oranları elde edilmesine yardımcı olur.

Asitleme ve elektroliz gibi kimyasal geri kazanım süreçlerinde yeni yöntemler ve reaktör tasarımları geliştirilmektedir. Örneğin, daha az zararlı kimyasallar kullanarak geri kazanım işlemlerinin gerçekleştirilmesi, çevresel etkileri azaltmaktadır. Ayrıca, biyomoleküllerin kullanıldığı alternatif kimyasal süreçler, daha sürdürülebilir geri kazanım yöntemleri sunmaktadır (Jiang vd., 2021).

Pirometalurji ve gazlaştırma gibi termal geri kazanım süreçlerinde enerji verimliliği artıran yeni teknolojiler geliştirilmiştir. Yüksek verimli ergitme fırınları ve gazlaştırma reaktörleri, daha düşük enerji tüketimi ile daha fazla geri kazanım sağlamak ve atık miktarını azaltmaktadır (Li vd., 2018).

Büyük veri analitiği ve nesnelerin interneti (IoT) teknolojileri, elektronik atık yönetim süreçlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknolojiler, atık akışlarının izlenmesi, geri dönüşüm süreçlerinin optimize edilmesi ve veri tabanlı karar verme süreçlerinin geliştirilmesine olanak tanır. Örneğin, gerçek zamanlı izleme sistemleri, atık miktarını ve bileşimini sürekli olarak analiz ederek geri dönüşüm süreçlerinin etkinliğini artırmaktadır (Raghu vd., 2020).

Teknolojik inovasyonlar ve iyileştirmeler, elektronik atıkların geri dönüşüm süreçlerini daha etkili ve sürdürülebilir hale getirmektedir. Otomasyon, gelişmiş ayırma teknolojileri, yenilikçi kimyasal yöntemler ve veri analitiği uygulamaları, bu alandaki en önemli gelişmeler arasında yer almaktadır. Bu inovasyonların sürekli olarak takip edilmesi ve uygulanması, çevresel etkiyi azaltacak ve kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır.

Elektronik atıkların yönetimi ve geri dönüşümü, ekonomik ve sosyal faktörlerden büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu faktörler, geri dönüşüm süreçlerinin etkinliğini, toplumun bu süreçlere katılımını ve genel olarak elektronik atıkların çevresel etkilerini belirlemekte önemli bir rol oynamaktadır. Aşağıda, bu ekonomik ve sosyal faktörlerin detaylı bir analizi sunulmaktadır.

Elektronik atıkların geri dönüşüm süreçleri, yüksek başlangıç maliyetleri gerektirebilir. Bu maliyetler, tesislerin kurulumu, teknolojik ekipmanların alınması ve iş gücü giderleri gibi kalemleri içermektedir. Yüksek maliyetler, bazı işletmelerin geri dönüşüm süreçlerine yatırım yapmasını engelleyebilir (Zhang vd., 2020).

Elektronik atıklardaki değerli metallerin (altın, gümüş, bakır vb.) fiyatları, geri dönüşümün ekonomik cazibesini etkileyen önemli bir faktördür. Değerli metal fiyatlarındaki dalgalanmalar, geri dönüşüm tesislerinin karlılığını ve sürdürülebilirliğini doğrudan etkilemektedir. Yüksek metal fiyatları, geri kazanım süreçlerinin teşvik edilmesine yardımcı olabilir (Zhou vd., 2019).

Hükümetler, elektronik atık geri dönüşümünü teşvik etmek amacıyla çeşitli destekler ve teşvikler sunmaktadır. Bu destekler, vergi indirimleri, hibe programları ve geri dönüşüm projeleri için finansman sağlayabilir. Bu tür destekler, geri dönüşüm endüstrisinin gelişimini hızlandırabilir (Kumar vd., 2021).

Elektronik atıkların geri dönüşüm süreçlerine toplumun katılımı, toplumsal bilincin ve farkındalığın artırılmasına bağlıdır. İnsanların elektronik atıklarını doğru bir şekilde ayırma ve geri dönüştürme konusundaki bilgileri, bu süreçlerin başarısını doğrudan etkileyebilir. Eğitim programları ve farkındalık kampanyaları, bu konuda önemli bir rol oynamaktadır (Chakraborty vd., 2020).

Farklı bölgelerdeki kültürel değerler, elektronik atıkların yönetimine yaklaşımı etkileyebilir. Bazı kültürlerde geri dönüşüm, çevresel bir sorumluluk olarak görülürken, diğerlerinde bu durum daha az önemsenebilir. Kültürel algılar, geri dönüşüm süreçlerine katılımı artırmak veya azaltmak için stratejilerin geliştirilmesinde dikkate alınmalıdır (Cucuzzella vd., 2021).

Elektronik atık geri dönüşüm sektörünün büyümesi, yeni iş fırsatları yaratmaktadır. Bu durum, yerel ekonomilere katkıda bulunmakta ve istihdamı artırmaktadır. Ancak, bu sektörün gelişmesi için nitelikli iş gücüne ihtiyaç vardır. Eğitim ve mesleki gelişim programları, sektörün ihtiyaç duyduğu iş gücünü sağlamak için önemlidir (Kumar vd., 2021).

Ekonomik ve sosyal faktörler, elektronik atıkların yönetimi ve geri dönüşümü süreçlerini şekillendiren önemli unsurlardır. Geri dönüşüm maliyetleri, değerli metal pazarları, hükümet destekleri, toplumsal bilinç, kültürel farklılıklar ve istihdam olanakları, bu süreçlerin etkinliğini ve sürdürülebilirliğini etkileyen anahtar faktörlerdir. Bu faktörlerin dikkate alınması, daha etkili ve kapsayıcı geri dönüşüm stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanır.

Elektronik atıkların yönetimi, çevresel ve sosyal açıdan önemli etkilere sahiptir. Bu etkilerin anlaşılması, etkili geri dönüşüm stratejilerinin geliştirilmesi ve sürdürülebilir uygulamaların teşvik edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Aşağıda, çevresel ve sosyal etkilerin detaylı bir değerlendirmesi sunulmaktadır. Çevresel etkiler şu şekildedir;

a.Toksik Madde Yayılımı

Elektronik atıklar, civa, kurşun, kadmiyum ve bromlu alev geciktiriciler gibi toksik maddeler içermektedir. Bu maddelerin uygun şekilde bertaraf edilmemesi, toprak, su ve hava kirliliğine yol açabilir. Özellikle, bu maddelerin doğaya sızması, ekosistemlere ve insan sağlığına ciddi tehditler oluşturabilir (Pinto vd., 2021).

b.Doğal Kaynakların Tükenmesi

Elektronik cihazların üretimi için gerekli olan doğal kaynakların çıkarılması, çevresel etkiler doğurur. Bu süreç, habitat kaybı, su ve enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarını içerir. Geri dönüşüm uygulamaları, bu kaynakların korunmasına yardımcı olabilir ve doğal kaynakların tükenmesini azaltabilir (Baldé vd., 2017).

c.Karbon Ayak İzi

Elektronik atıkların işlenmesi ve geri dönüştürülmesi, enerji tüketimi ile ilişkilidir. Geri dönüşüm süreçlerinde kullanılan enerji kaynakları, fosil yakıtlar ise, karbon emisyonlarına neden olabilir. Ancak, doğru yönetilen geri dönüşüm süreçleri, yeni ürünlerin üretiminde gereken enerji miktarını azaltarak karbon ayak izini düşürebilir (Kumar vd., 2021).

Sosyal etkiler ise aşağıdaki şekilde değerlendirilebilir:

a.Sağlık Riski

Toksik maddelerin elektronik atıklardan yayılması, özellikle düşük gelirli bölgelerde yaşayan insanlar için sağlık risklerini artırmaktadır. Elektronik atıkların geri dönüşüm süreçlerinde çalışan işçiler, bu toksik maddelere maruz kalma riski taşımaktadır. Bu durum, meslek hastalıklarına ve sağlık sorunlarına yol açabilir (Hussain vd., 2020).

b.Ekonomik Fırsatlar

Elektronik atıkların geri dönüşümü, yerel ekonomilere katkıda bulunabilir ve yeni iş olanakları yaratabilir. Geri dönüşüm tesisleri, istihdam sağlamanın yanı sıra, yerel topluluklara ekonomik faydalar sağlayabilir. Bu durum, toplumsal kalkınma ve sürdürülebilirlik açısından önemlidir (Zhang vd., 2020).

c.Toplumsal Bilinç ve Eğitimin Önemi

Elektronik atıkların çevresel etkileri hakkında toplumsal bilinç oluşturulması, geri dönüşüm süreçlerinin başarısını artırabilir. Eğitim programları, bireylerin elektronik atıkları nasıl yönetmeleri gerektiği konusunda bilgi sahibi olmalarını sağlayarak, geri dönüşüm oranlarını artırabilir (Chakraborty vd., 2020).

Çevresel ve sosyal etkilerin değerlendirilmesi, elektronik atıkların yönetimi konusunda bilinçli kararlar alınmasına yardımcı olur. Toksik maddelerin yayılımı, doğal kaynakların tükenmesi ve sağlık riskleri gibi çevresel etkilerin yanı sıra, ekonomik fırsatlar ve toplumsal bilinç gibi sosyal etkiler de dikkate alınmalıdır. Bu etkilerin yönetilmesi, sürdürülebilir bir gelecek için önemlidir.

Elektronik atık işleme tesislerinin ve geri dönüşüm teknolojilerinin incelenmesi, tesislerin çalışma prensiplerini, verimliliğini, çevresel etkilerini ve ekonomik önemini anlamak için kapsamlı bir analiz gerektirir. Bu analiz, daha etkili ve sürdürülebilir elektronik atık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine yardımcı olur.

3.24 Değerli Metal Geri Kazanımı için Kullanılan Yöntemlerin Analizi

Değerli metal geri kazanımı için kullanılan yöntemlerin analizi, elektronik atıklardan altın, gümüş, bakır, paladyum gibi metallerin verimli bir şekilde çıkarılması ve geri dönüştürülmesini sağlar. Aşağıda, bu yöntemlerin detaylı bir analizi sunulmaktadır:

3.24.1 Fiziksel ayırma yöntemleri

3.24.1.1 Gömülü metal çıkarma

Elektronik atıkların öğütülmesi ve daha sonra mıknatıslanabilir metallerin manyetik ayırıcılarla çıkarılması yöntemi, değerli metallerin verimliliğini artırmaktadır (Li vd., 2013).

3.24.1.2 Optik ayırma

Optik ayırıcılarla görüntü işleme teknikleri kullanılarak elektronik atıkların farklı malzemelere ayrılması, yüksek hassasiyetle malzeme ayrıştırması yapmaktadır (Huang vd., 2020).

3.24.1.3 Yoğunluk ayırma

Elektronik atıkların yoğunluk farklarına göre ayrılması için hava tabanlı veya sıvı tabanlı ayırma teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntem, metal bileşenlerin etkin bir şekilde ayrılmasına olanak tanır (Xu vd., 2021).

3.24.2 Kimyasal ayırma yöntemleri

3.24.2.1 Asit ayırma

Elektronik atıkların asitlerle işlenmesi, metal bileşenlerin asit içinde çözünmesi ve ardından ayrılması, yüksek verimlilikle gerçekleştirilmektedir (Sarkar vd., 2018).

3.24.2.2 Sıvı sıvı ekstraksiyonu

Metal bileşenlerin organik çözücülerle ekstraksiyonu ve daha sonra organik fazdan metalin ayrılması, değerli metallerin geri kazanımında etkili bir yöntemdir (Mansoori vd., 2017).

3.24.2.3 Çöktürme (precipitation)

Metal iyonlarının bir çökeltici madde eklenerek çöktürülmesi ve ardından ayrılması, bu yöntemle değerli metallerin geri kazanımını sağlamaktadır (Faraji vd., 2021).

3.24.3 Elektrokimyasal yöntemler

3.24.3.1 Elektroliz

Metal iyonlarının elektrotlar arasında bir elektrolit çözeltisi içinde elektrik akımı kullanılarak çöktürülmesi, değerli metallerin verimli bir şekilde geri kazanımını sağlar.

3.24.3.2 Elektrokimyasal çözünme

Değerli metal kaplı bileşenlerin elektrolit çözeltisi içinde çözünerek ayrılması, elektrokimyasal yöntemlerin bir diğer etkili uygulamasıdır (Kumar vd., 2019).

3.24.4 Termal yöntemler

3.24.4.1 Pirometalurji

Elektronik atıkların yüksek sıcaklıkta eritilerek metal bileşenlerin ayrılması, termal geri kazanım süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.24.4.2 Kızgın tuz elektrolizi

Elektronik atıkların kızgın tuzlar içinde elektrokimyasal ayrılması, etkili bir metal geri kazanım yöntemi olarak öne çıkmaktadır (Hao vd., 2020).

3.24.5 Biyolojik yöntemler

3.24.5.1 Bakteriyel liç

Metal iyonlarını çözen özel bakterilerin kullanılması, biyolojik geri kazanımda inovatif bir yaklaşım sunmaktadır (Zhou vd., 2019).

3.24.5.2 Fotosentez

Değerli metal iyonlarının bitkiler tarafından alınması ve ardından bitki biyokütlesinden ayrılması, doğal ve sürdürülebilir bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Ravikumar, 2020).

3.24.6 Hibrit yöntemler

3.24.6.1 Birleşik fiziksel-kimyasal yöntemler

Fiziksel ve kimyasal yöntemlerin bir arada kullanılması, verimliliği artırmaktadır (Zhang vd., 2021).

3.24.6.2 Birleşik elektrokimyasal-termal yöntemler

Elektrokimyasal ve termal yöntemlerin birleştirilmesi, daha karmaşık atıkların işlenmesini sağlar (Sun vd., 2019).

3.24.7 İnovatif yöntemler

3.24.7.1 Ultrasonik ayırma

Yüksek frekanslı ses dalgalarının kullanılmasıyla malzemelerin ayrılması, değerli metal geri kazanımında yeni bir yaklaşım sunmaktadır (Liu vd., 2023).

3.24.7.2 Plazma ark yakma

Elektronik atıkların plazma arkında yüksek sıcaklıkta yanması ve metalin geri kazanılması, enerji verimliliği yüksek bir yöntemdir (Huang vd., 2021).

Değerli metal geri kazanımı için kullanılan bu yöntemlerin analizi, her bir yöntemin avantajlarını, dezavantajlarını, verimliliklerini ve maliyetlerini değerlendirmeyi sağlar. Uygun yöntemlerin seçilmesi, elektronik atıkların verimli bir şekilde işlenmesini ve değerli metallerin geri dönüştürülmesini temin eder.

4 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Elektronik Atıkların İçinde Bulunan Değerli Metallerin Miktarı ve Bileşimi

Elektronik atıkların içinde bulunan değerli metallerin miktarı ve bileşimi, atıkların türüne, kaynağına ve işlenme aşamasına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ancak genel olarak, elektronik atıklar yüksek miktarda değerli metaller içermektedir. Aşağıda, tipik olarak elektronik atıklarda bulunan değerli metaller ve bunların miktarları özetlenmiştir:

4.1.1 Altın (AU)

Miktar: Elektronik atıkların içinde bulunan altın miktarı genellikle düşüktür, ancak ton başına oldukça değerlidir.

Kaynak: Özellikle elektronik devre kartlarında (PCB'ler), konektörlerde ve kontak noktalarında bulunur.

Değer: Değerli metallerin geri dönüştürülmesi için en çok talep gören metallerden biridir.

4.1.2 Gümüş (AG)

Miktar: Elektronik atıkların içinde bulunan gümüş miktarı genellikle altından daha yüksektir.

Kaynak: Kontak noktaları, bağlantı telleri, manyetik anahtarlar ve röleler gibi bileşenlerde bulunur.

Değer: Altın gibi, gümüş de elektriksel iletkenliği nedeniyle değerlidir.

4.1.3 Bakır (CU)

Miktar: Elektronik atıkların içinde en bol bulunan metal genellikle bakırdır.

Kaynak: Elektrik kabloları, devre kartları, transformatörler, motorlar ve bobinler gibi bileşenlerde yaygın olarak bulunur.

Değer: Yüksek iletkenlik özelliği bakımından elektronik endüstrisinde önemli bir rol oynamaktadır (Krause vd., 2018).

4.1.4 Paladyum (PD)

Miktar: Paladyum, elektronik atıkların içinde bulunan nadir ve değerli bir metaldir.

Kaynak: Katalitik dönüştürücüler, sensörler, kondansatörler ve hücre telefonları gibi bileşenlerde bulunabilir.

Değer: Altın ve platin gibi diğer değerli metallerin yerine kullanılabilir (Zhang vd., 2021).

4.1.5 Platin (PT)

Miktar: Platin, elektronik atıkların içinde bulunan diğer nadir ve değerli bir metaldir.

Kaynak: Katalitik dönüştürücüler, termal sensörler, elektrolit kapasitörler ve tıbbi cihazlar gibi bileşenlerde bulunabilir.

Değer: Yüksek dayanıklılığı ve kimyasal direnci nedeniyle değerlidir.

4.1.6 Diğer değerli metaller

Elektronik atıklar ayrıca daha az miktarda bulunan diğer değerli metalleri de içerebilir. Bunlar arasında rutenyum (Ru), iridyum (Ir) ve osmiyum (Os) gibi metaller yer alabilir (Liu vd., 2019). Elektronik atıkların bileşimi, farklı cihazlardan ve endüstriyel uygulamalardan kaynaklanan farklı malzemelerin bir kombinasyonunu içermektedir. Bu nedenle, atıkların içindeki değerli metallerin miktarı ve bileşimi, atıkların kaynağına ve işleme sürecine bağlı olarak büyük ölçüde değişim göstermektedir.

4.2 Geri Dönüşüm Teknolojilerinin Etkinliği ve Verimliliği

Geri dönüşüm teknolojilerinin etkinliği ve verimliliği, kullanılan yöntemlere, işlem süreçlerine, atıkların kaynağına ve işlem kapasitesine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ancak genel olarak, geri dönüşüm teknolojilerinin etkinliği ve verimliliği aşağıdaki faktörlere dayanır:

4.2.1 Malzeme ayrıştırma ve sınıflandırma

Elektronik atıkların etkin bir şekilde ayrıştırılması ve sınıflandırılması, geri dönüşüm sürecinin başarısı için kritik öneme sahiptir. İyi bir ayrıştırma işlemi, değerli metallerin doğru şekilde izole edilmesini sağlar (Babu vd., 2020).

4.2.2 İşlem teknolojisi ve ekipmanlar

Kullanılan işlem teknolojileri ve ekipmanlar, geri dönüşümün etkinliğini belirler. Örneğin, yüksek verimli öğütme makineleri, optik ayırma sistemleri, manyetik ayırıcılar ve elektroliz tankları gibi ekipmanlar, geri dönüşüm verimliliğini artırır (Rios vd., 2019).

4.2.3 Kimyasal ve fiziksel işlemler

Kimyasal ve fiziksel işlemler, değerli metallerin çıkarılması ve ayrılması için kritik öneme sahiptir. Asitleme, ekstraksiyon, elektroliz ve pirometalurji gibi işlemler, değerli metallerin geri kazanılmasını sağlar.

4.2.4 Atık akışı ve konsantrasyonu

Geri dönüşüm tesislerine gelen atık akışı ve içerdikleri metallerin konsantrasyonu, işlemlerin etkinliğini etkiler. Daha yoğun ve temiz atık akışları, daha yüksek geri dönüşüm verimliliği sağlar (Kumar vd., 2020).

4.2.5 Çevresel ve enerji performansı

Geri dönüşüm teknolojilerinin çevresel etkileri ve enerji tüketimi, teknolojilerin sürdürülebilirliğini belirler. Daha az enerji tüketen ve çevreye daha az zarar veren teknolojiler, daha etkili kabul edilmektedir (Mikova vd., 2021).

4.2.6 Ekonomik faktörler

Geri dönüşüm teknolojilerinin maliyeti ve ekonomik geri dönüşü, işletme sahipleri için önemlidir. Daha düşük maliyetli ve daha karlı teknolojiler, işletmelerin uzun vadeli başarısını sağlar (Meyer vd., 2019).

4.2.7 Yönetim ve operasyonel pratikler

İyi bir yönetim ve operasyonel uygulama, geri dönüşüm tesislerinin etkinliğini artırır. Uygun eğitimli personel, düzenli bakım ve kalite kontrol süreçleri, verimliliği artırır (Gonzalez vd., 2020).

8. Yasal ve Regülatif Çerçeve

Yasal düzenlemeler, geri dönüşüm teknolojilerinin kullanımını ve performansını belirler. Daha katı çevresel standartlar, daha yüksek geri dönüşüm verimliliğini teşvik eder (Li vd., 2021).

Sonuç olarak, geri dönüşüm teknolojilerinin etkinliği ve verimliliği, birden çok faktörün etkileşiminden oluşur. Doğru teknoloji seçimi, uygun işlem süreçleri ve iyi yönetim uygulamaları, yüksek verimlilik ve başarı sağlar. Bu nedenle, geri dönüşüm endüstrisinde sürekli olarak teknolojik yeniliklerin takip edilmesi ve iyileştirilmesi önemlidir.

4.3 Çevresel Etkiler ve Sürdürülebilirlik

Elektronik atık geri dönüşümü ve işlenmesi süreçlerinin çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik açısından önemi büyüktür. Aşağıda bu konuyla ilgili bazı ana başlıklar ve açıklamaları yer almaktadır:

4.3.1 Kaynakların korunması

Elektronik atıkların geri dönüşümü, doğal kaynakların korunmasına önemli katkı sağlar. Değerli metallerin geri kazanılması, madencilik faaliyetlerinin azalmasına yardımcı olur ve böylece doğal kaynakların tükenmesini önler (Sharma vd., 2020).

4.3.2 Enerji tasarrufu

Yeniden kullanım ve geri dönüşüm, yeni ürünlerin üretilmesi için gereken enerji miktarını önemli ölçüde azaltır. Örneğin, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması, ham madde çıkarımı ve işleme süreçlerinde enerji tasarrufu sağlar (Haas vd., 2021).

4.3.3 Atık miktarının azaltılması

Elektronik atıkların geri dönüşümü, atıkların depolama sahalarına gitmesini önleyerek çevre kirliliğinin azalmasına yardımcı olur. Bu, atık miktarının azaltılmasını ve atıkların yönetimi için daha az alanın kullanılmasını sağlar (Kumar vd., 2019).

4.3.4 Zehirli maddelerin kontrolü

Elektronik atıklar içinde bulunan zehirli maddelerin (örneğin, cıva, kurşun, kadmiyum gibi) çevreye zarar vermesi engellenir. Geri dönüşüm süreçleri, bu zehirli maddelerin güvenli bir şekilde işlenmesini ve bertarafını sağlar (Zhang vd., 2022).

4.3.5 Hava ve su kirliliğinin azaltılması

Elektronik atıkların yanması veya çöplüklere gömülmesi sonucu oluşabilecek hava ve su kirliliği geri dönüşüm süreçleri sayesinde önlenir. Bu süreçler, atıkların yakılması veya toprağa gömülmesi yerine değerli bileşenlerin geri kazanılmasına olanak tanır (Wang vd., 2021).

4.3.6 İklim değişikliğinin azaltılması

Elektronik atık geri dönüşümü, sera gazı emisyonlarını azaltarak iklim değişikliğine karşı mücadeleye katkıda bulunur. Yeniden kullanım ve geri dönüşüm, yeni malzemelerin üretilmesi için gerekli enerji tüketimini azaltarak karbon ayak izini düşürür (Milios vd., 2020).

4.3.7 Yerel ekonomilere katkı

Elektronik atık geri dönüşümü, yerel ekonomilere katkıda bulunur. Geri dönüşüm endüstrisi, istihdam yaratır ve yerel işletmelere destek sağlar. Ayrıca, değerli metallerin geri kazanılmasıyla ekonomik değer artışı sağlanır (Nguyen vd., 2021).

4.3.8 Döngüsel ekonomiye geçiş

Elektronik atık geri dönüşümü, döngüsel ekonomiye geçişi teşvik eder. Bu model, malzemelerin kullanım ömrünün uzatılması, kaynakların etkin ve verimli kullanılması ve atıkların yeniden dönüştürülmesi prensiplerine dayanır (Kirchgeorg vd., 2020).

Bu nedenlerle, elektronik atık geri dönüşümü ve işlenmesi, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir bir gelecek için kritik bir rol oynar. Bu süreçlerin etkin bir şekilde uygulanması, çevresel ve ekonomik faydaların en üst düzeye çıkarılmasını sağlar.

4.4 Ekonomik Analiz: Maliyet-Fayda Analizi ve Değerli Metal Fiyatlarının Etkisi

Ekonomik analiz, elektronik atık geri dönüşümü için önemli bir boyuttur ve maliyet-fayda analizi ile değerli metal fiyatlarının etkisi, bu analizin önemli unsurlarını oluşturur.

4.4.1 Maliyet-fayda analizi

a.Maliyetler

İşletme Maliyetleri: Tesisin kurulumu, ekipmanların alımı ve bakımı, personel maaşları gibi işletme maliyetleri (Forss ve Keil, 2018).

Atık Toplama ve Taşıma Maliyetleri: Elektronik atıkların toplanması, taşınması ve tesislere ulaştırılması için gerekli olan maliyetler (WEEE Directive, 2012).

İşlem Maliyetleri: Atıkların işlenmesi, ayrıştırılması, değerli metallerin çıkarılması ve geri dönüşümü için gerekli olan maliyetler (Tanskanen, 2013).

Çevresel ve Sosyal Maliyetler: Atıkların bertarafı ve çevresel etkilerinin kontrolü için gerekli olan maliyetler (Gupta ve Singh, 2020).

b.Faydalar

Değerli Metal Kazancı: Geri dönüştürülen değerli metallerin satışından elde edilen gelir (Forss ve Keil, 2018).

Enerji Tasarrufu: Geri dönüştürülen malzemelerin üretiminde enerji tasarrufu sağlanması (Tanskanen, 2013).

Doğal Kaynak Korunması: Yeni malzemelerin üretimi için kullanılacak olan doğal kaynakların korunması (Gupta ve Singh, 2020).

Maliyetler ile faydalar arasındaki denge, geri dönüşüm işleminin ekonomik olarak sürdürülebilir olup olmadığını belirler. Maliyetlerin faydalardan daha düşük olması gereklidir.

4.4.2 Değerli metal fiyatlarının etkisi

Değerli metal fiyatları, elektronik atık geri dönüşümü endüstrisi için kritik öneme sahiptir. Değerli metal fiyatlarındaki değişimler, geri dönüşüm işlemlerinin karlılığını ve işletme gelirlerini doğrudan etkiler.

a.Yüksek Fiyatlar: Değerli metal fiyatlarının yüksek olması, geri dönüşüm işlemlerini karlı hale getirir. Bu durum, atıkların geri dönüştürülmesini teşvik eder (Forss ve Keil, 2018).

b.Düşük Fiyatlar: Değerli metal fiyatlarının düşük olması, geri dönüşüm işlemlerinin karlılığını azaltır. Bu durum, geri dönüşüm endüstrisini zorlar ve bazen işletmelerin karlılığını etkileyebilir (Tanskanen, 2013).

c.Dalgalanmalar: Değerli metal fiyatlarındaki dalgalanmalar, sektörde belirsizlik yaratır ve yatırımcılar için risk oluşturur. İşletmeler, fiyat dalgalanmalarına karşı dayanıklı olabilmek için stratejiler geliştirmelidir (Gupta ve Singh, 2020).

Değerli metal fiyatlarının yanı sıra, teknolojik yenilikler, maliyet etkinliği ve piyasa talebi gibi faktörler de geri dönüşüm endüstrisini etkiler. Bu nedenle, geri dönüşüm işletmeleri, fiyat değişikliklerine uyum sağlayabilen esnek ve verimli bir yapıya sahip olmalıdır.

4.5 Türkiye’de Elektronik Atık Geri Dönüşümünün Mevcut Durumu

4.5.1 Türkiye’de faaliyet gösteren elektronik atık geri dönüşüm tesisleri

Türkiye’de elektronik atık (e-atık) geri dönüşümü hem çevresel hem de ekonomik açıdan giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından belirlenen yönetmelikler doğrultusunda, e-atıkların lisanslı tesislerde işlenmesi gerekmektedir. Türkiye’de bu alanda faaliyet gösteren çeşitli geri dönüşüm tesisleri, e-atıkların toplanması, ayrıştırılması, işlenmesi ve değerli metallerin geri kazanılması süreçlerini yürütmektedir.

4.5.2 Elektronik atık geri dönüşümünün mevcut durumu

Türkiye’de elektronik atık geri dönüşümü, Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği kapsamında yürütülmektedir. Bu yönetmelik, e-atıkların çevreye zarar vermeden toplanması ve geri kazanılmasını zorunlu kılmaktadır. Lisanslı tesisler, belirli standartlara uygun şekilde e-atıkları ayrıştırarak, içerdikleri değerli metallerin geri kazanımını sağlamaktadır.

4.5.3 Türkiye’deki lisanslı elektronik atık geri dönüşüm tesisleri

Türkiye’de faaliyet gösteren bazı lisanslı elektronik atık geri dönüşüm tesisleri şunlardır;

a.Exitcom Recycling (Kocaeli, İstanbul): Türkiye’nin önde gelen e-atık geri dönüşüm tesislerinden biri olup, elektronik atıklardan altın, gümüş ve bakır gibi metallerin geri kazanımını sağlamaktadır.

b.Eldan Recycling (İstanbul): Elektronik atıkların parçalanması, ayrıştırılması ve metallerin geri kazanımı üzerine faaliyet göstermektedir.

c.Mükremin Geri Dönüşüm (Ankara): E-atıkların toplama, taşıma ve işlenmesi süreçlerini yürütmektedir.

d.Yeşil Geri Dönüşüm (İzmir): Elektronik atıkların çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesine yönelik çalışmaları ile bilinen bir tesistir.

e.Tümaş Elektronik Atık Geri Dönüşüm (Adana): Elektronik atıkların yanı sıra pillerin geri dönüşümü üzerine uzmanlaşmıştır.

Bu tesisler, bilgisayarlar, cep telefonları, televizyonlar, endüstriyel elektronik cihazlar ve bataryalar gibi çeşitli e-atıkları işleyerek değerli metallerin ekonomiye kazandırılmasını sağlamaktadır.

4.5.4 Türkiye’de elektronik atık geri dönüşüm süreçleri

Elektronik atık geri dönüşüm tesislerinde genel olarak aşağıdaki süreçler uygulanmaktadır;

a.Atık Toplama ve Taşıma: E-atıklar, yetkili kurumlar tarafından belirlenen toplama noktalarından alınarak lisanslı tesislere taşınır.

b.Ön İşleme ve Söküm: Atıklar bileşenlerine ayrılır. Plastik, metal ve cam gibi farklı malzemeler ayrıştırılır.

c.Değerli Metal Geri Kazanımı: Altın, gümüş, bakır, paladyum ve platin gibi değerli metaller çeşitli kimyasal ve mekanik işlemlerle geri kazanılır.

d.Geri Kazanılan Malzemelerin Yeniden Kullanımı: Elde edilen saf metaller, farklı endüstrilerde hammadde olarak kullanılır.

4.5.5 Elektronik atık geri dönüşümünün önemi ve gelecek perspektifi

Türkiye’de e-atık geri dönüşüm sektörü hem çevresel hem de ekonomik nedenlerle büyümeye devam etmektedir. Geri dönüşüm tesislerinin sayısının artırılması ve mevcut teknolojilerin geliştirilmesi, ülkenin doğal kaynaklarının korunmasına yardımcı olacaktır. Ayrıca, döngüsel ekonomi anlayışı çerçevesinde, geri kazanılan metallerin yurtiçinde değerlendirilmesi ekonomiye önemli katkılar sunacaktır.

4.5.6 İşleyiş süreçleri ve kapasiteleri

Türkiye’de faaliyet gösteren elektronik atık geri dönüşüm tesisleri, atık toplama, sınıflandırma, parçalama, metal geri kazanımı ve nihai bertaraf gibi çeşitli aşamalardan oluşan bir süreç yönetmektedir. Bu tesislerin işleyiş süreçleri, kullanılan teknolojiye ve kapasiteye bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Elektronik atık geri dönüşüm tesislerinde uygulanan ana süreçler şunlardır:

a.Toplama ve Taşıma:

Elektronik atıklar (e-atıklar), belediyeler, yetkili toplama merkezleri, perakende satıcılar ve sanayi kuruluşlarından toplanır.

Toplanan atıklar, ilgili yönetmeliklere uygun şekilde lisanslı geri dönüşüm tesislerine sevk edilir.

b.Sınıflandırma ve Ayırıştırma:

E-atıklar türlerine göre ayrıştırılır (beyaz eşyalar, bilgisayarlar, cep telefonları, televizyonlar vb.).

Plastik, metal, cam ve devre kartları gibi farklı malzemeler özel makineler yardımıyla ayrılır.

c.Parçalama ve Ön İşleme:

Büyük elektronik bileşenler, mekanik kırıcılar ve öğütücüler ile daha küçük parçalara ayrılır.

Ağır metaller ve zararlı maddeler (cıva, kurşun gibi) uygun yöntemlerle güvenli bir şekilde ayrıştırılır ve bertaraf edilir.

d.Değerli Metal Geri Kazanımı:

Altın, gümüş, bakır, paladyum ve platin gibi metaller kimyasal veya mekanik yöntemlerle geri kazanılır.

Hidrometalurjik (asit çözeltileri ile metal ayrıştırma) veya pirometalurjik (yüksek sıcaklıkta metal eritme) yöntemler kullanılabilir.

e.İkincil Hammadde Kullanımı:

Geri kazanılan metaller, rafine edilerek sanayiye geri kazandırılır.

Plastik ve cam malzemeler uygun şekilde yeniden işlenir veya başka sanayi dallarında kullanılır.

f.Nihai Bertaraf:

Geri dönüşüm sürecinde tehlikeli ve zararlı atıklar bertaraf tesislerine yönlendirilir.

Çevreye zarar vermemesi için belirlenen düzenlemelere uygun şekilde imha edilir.

4.5.7 Kapasiteler ve tesislerin işleme gücü

Türkiye’de faaliyet gösteren elektronik atık geri dönüşüm tesislerinin kapasiteleri, tesisin büyüklüğüne, işleme kapasitesine ve kullanılan teknolojiye göre değişmektedir. Genel olarak:

Büyük ölçekli tesisler yılda 10.000-50.000 ton e-atık işleyebilir.

Orta ölçekli tesisler yılda 5.000-10.000 ton işleme kapasitesine sahiptir.

Küçük ölçekli tesisler ise 1.000-5.000 ton aralığında e-atık işleyebilmektedir.

Bu tesislerde bilgisayarlar, cep telefonları, televizyonlar, büyük ev aletleri, endüstriyel elektronik bileşenler ve bataryalar işlenmektedir.

4.5.8 Örnek tesislerin kapasiteleri

a.Exitcom Recycling (Kocaeli, İstanbul): Yıllık yaklaşık 30.000 ton e-atık işleme kapasitesine sahiptir.

b.Eldan Recycling (İstanbul): 15.000 ton/yıl kapasiteli olup, bilgisayar, beyaz eşya ve cep telefonları gibi çeşitli e-atıkları işlemektedir.

c.Tümaş Elektronik Geri Dönüşüm (Adana): 10.000 ton/yıl kapasiteli bir geri dönüşüm tesisidir.

d.Yeşil Geri Dönüşüm (İzmir): Özellikle endüstriyel elektronik bileşenlerin geri dönüşümünde uzmanlaşmıştır ve 5.000 ton/yıl kapasiteye sahiptir.

Bu tesisler, Türkiye’de elektronik atık yönetimi konusunda önemli rol oynamakta ve sürdürülebilir atık yönetimi hedeflerine katkı sağlamaktadır.

4.5.9 Karşılaşılan sorunlar ve fırsatlar

Elektronik atık (e-atık) geri dönüşüm sektörü, büyük çevresel ve ekonomik fırsatlar sunarken, aynı zamanda çeşitli zorluklarla da karşı karşıyadır. Türkiye’deki elektronik atık geri dönüşüm sürecinde yaşanan temel sorunlar ve bu alanda ortaya çıkan fırsatlar aşağıda ele alınmaktadır.

4.5.9.1 Karşılaşılan sorunlar

a.Yetersiz Toplama ve Farkındalık Eksikliği

Türkiye’de e-atıkların büyük bir kısmı lisanslı geri dönüşüm tesislerine ulaşmadan doğrudan çöpe atılmakta veya kayıt dışı yöntemlerle geri dönüştürülmektedir.

Toplumsal elektronik atıkların çevresel ve ekonomik değerleri konusunda farkındalığı düşük olup, evlerde ve iş yerlerinde uygun şekilde ayrıştırma alışkanlığı henüz yaygınlaşmamıştır.

b.Kayıt Dışı Geri Dönüşüm Faaliyetleri

Türkiye’de bazı e-atıklar, lisanssız toplayıcılar veya merdiven altı tesisler tarafından işlenmekte ve bu süreçte çevreye zararlı kimyasallar kontrolsüz bir şekilde doğaya salınmaktadır.

Kayıt dışı sektörde, işçi sağlığı ve güvenliği de göz ardı edilmekte ve tehlikeli maddelerle çalışan kişilerin sağlık riski artmaktadır.

c.Teknolojik Yetersizlik ve Yatırım Eksikliği

Gelişmiş ülkelerde uygulanan ileri düzeyde hidrometalurjik ve pirometalurjik süreçler Türkiye’de sınırlı olarak kullanılmaktadır.

E-atıkların geri kazanımı için yüksek maliyetli teknolojilere erişim kısıtlı olup, bu da işlem verimliliğini azaltmaktadır.

d.Düzenleyici Zorluklar ve Yasal Eksiklikler

Türkiye’de elektronik atıkların yönetimi için belirli düzenlemeler ve yönetmelikler bulunsa da uygulamada etkin denetim mekanizmaları eksik kalmaktadır.

E-atık geri dönüşümüne yönelik teşvik mekanizmalarının yetersiz olması, sektörün büyümesini sınırlayan faktörlerden biridir.

e.İthalat ve Hammadde Bağımlılığı

Türkiye’de geri dönüştürülen metallerin büyük bir kısmı yurt dışına ihraç edilirken, bazı değerli metallerin işlenmesi için hâlâ ithalat bağımlılığı bulunmaktadır.

Geri dönüşüm sektörünün büyümesi için yerel işleme kapasitesinin artırılması gerekmektedir.

4.5.9.2 Fırsatlar

a.Ekonomik Kazanç ve İstihdam Olanakları

Türkiye’de e-atık geri dönüşümü sektörü hızla büyüyen bir alan olup, bu alanda yeni yatırımların yapılmasıyla istihdam artışı sağlanabilir.

Geri dönüşümden elde edilen metallerin iç piyasada kullanımı teşvik edilerek, sanayi sektörünün ithalata bağımlılığı azaltılabilir.

b.Çevresel Sürdürülebilirlik ve Doğal Kaynak Koruma

Geri dönüşüm süreçlerinin yaygınlaştırılması, madencilik faaliyetlerine olan ihtiyacı azaltarak doğal kaynakların korunmasına katkı sağlayacaktır.

E-atıkların çevreye zarar vermeden işlenmesi, toprak, su ve hava kirliliğinin önlenmesine yardımcı olacaktır.

c.Yasal Düzenlemeler ve Teşviklerin Güçlendirilmesi

Türkiye’de yürürlüğe giren Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi Yönetmeliği, kayıt dışı faaliyetlerin önüne geçmek ve geri dönüşüm sektörünü teşvik etmek için önemli bir adımdır.

Devlet teşvikleri ve vergi indirimleri ile özel sektörün geri dönüşüm yatırımları artırılabilir.

d.Teknolojik Gelişmeler ve Verimlilik Artışı

Geri dönüşüm teknolojilerindeki yenilikler, e-atıklardan daha yüksek oranlarda metal geri kazanımını mümkün kılmaktadır.

Türkiye’de yeni tesislerin kurulması ve mevcut tesislerin modernizasyonu ile işleme kapasitesi artırılabilir.

e.Küresel Pazar ve İhracat Fırsatları

Türkiye, e-atık geri dönüşümünde bölgesel bir merkez haline gelebilir ve çevre ülkelerden e-atık ithal ederek işleyebilir.

Geri dönüştürülmüş metallerin yurt dışı pazarlara ihracatı ile ekonomik kazanımlar artırılabilir.

Türkiye’de elektronik atık geri dönüşüm sektörü, bazı yapısal sorunlarla karşı karşıya olsa da ekonomik ve çevresel faydalar açısından büyük bir potansiyel taşımaktadır. Toplama sistemlerinin geliştirilmesi, teknolojiye yapılan yatırımların artırılması ve kayıt dışı faaliyetlerin önlenmesi ile sektörün sürdürülebilir büyümesi sağlanabilir. Ayrıca, kamu bilincinin artırılması, devlet teşviklerinin güçlendirilmesi ve uluslararası iş birliklerinin geliştirilmesi ile Türkiye, bölgesel bir e-atık geri dönüşüm merkezi haline gelebilir.

4.5.10 Türkiye’deki elektronik atık geri dönüşüm tesisleri ve örnek uygulamalar

Türkiye’de elektronik atık geri dönüşüm sektöründe faaliyet gösteren çeşitli tesisler, farklı ölçeklerde operasyonlar yürütmekte ve çeşitli işleme yöntemleri kullanmaktadır. Bu tesisler, atık toplama, ayrıştırma, değerli metal geri kazanımı ve bertaraf süreçlerini yöneterek çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır.

4.5.10.1 Türkiye’deki önde gelen elektronik atık geri dönüşüm tesisleri

Türkiye’de faaliyet gösteren lisanslı e-atık geri dönüşüm tesisleri, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından belirlenen kriterlere uygun olarak çalışmaktadır. Öne çıkan bazı tesisler şunlardır:

a.Exitcom Recycling (Kocaeli)

Türkiye'nin ilk lisanslı elektronik atık geri dönüşüm firmalarından biridir.

Değerli metal geri kazanımı ve veri imha hizmetleri sunmaktadır.

b.Eldan Recycling (İstanbul)

Elektronik kartlar ve kablolar gibi yüksek değerli metaller içeren atıkları işleyerek bakır, alüminyum ve altın geri kazanımı sağlamaktadır.

c.MOTAT (Mobil Atık Takip Sistemi) Entegre Tesisleri (Ankara ve İstanbul)

Elektronik atıkların toplanmasını ve yönetilmesini sağlamaktadır.

Çeşitli kamu ve özel sektör kuruluşları ile iş birliği yaparak atık yönetimini denetlemektedir.

d.Umay Geri Dönüşüm (İzmir)

Bilişim sektöründen gelen e-atıkları işleyerek tekrar kullanılabilir malzemeler üretmektedir.

Bu tesisler, Avrupa Birliği ve ulusal mevzuatlara uygun olarak faaliyet göstererek hem çevre dostu uygulamalar geliştirmekte hem de Türkiye’de geri dönüşüm bilincinin artmasına katkıda bulunmaktadır.

4.5.10.2 İş akış süreçleri

Elektronik atık geri dönüşüm tesislerinde genel işleyiş süreci şu aşamalardan oluşmaktadır:

a.Atık Toplama ve Taşıma

E-atıklar, bireyler, işletmeler, belediyeler ve yetkilendirilmiş toplama noktaları tarafından tesislere yönlendirilir.

Mobil atık toplama sistemleri veya belediye anlaşmaları ile atıklar belirlenen noktalardan toplanır.

b.Ön İşleme ve Manuel Ayırıştırma

Toplanan e-atıklar, türlerine göre (beyaz eşya, küçük ev aletleri, bilgisayarlar vb.) sınıflandırılır.

Büyük parçalar ayrılır ve manuel olarak tehlikeli bileşenlerin çıkarılması sağlanır.

c.Mekanik Parçalama ve Öğütme

Elektronik devre kartları ve kablolar gibi parçalar, mekanik öğütücülerde küçük parçalara ayrılır.

Metal, plastik ve seramik gibi malzemeler, manyetik ve optik ayırma sistemleri ile birbirinden ayrıştırılır.

d.Değerli Metal Geri Kazanımı

Altın, bakır, gümüş ve paladyum gibi değerli metaller, kimyasal veya elektrolitik yöntemlerle geri kazanılır.

Hidrometalurjik ve pirometalurjik süreçler kullanılarak saf metal üretimi gerçekleştirilir.

e.Geri Kazanım ve Yeniden Kullanım

Ayrıştırılan metaller, cam ve plastikler yeniden işlenerek sanayiye hammadde olarak sunulur.

Tehlikeli atık içeren malzemeler, özel bertaraf tesislerine yönlendirilir.

f.Nihai Bertaraf ve Atık Yönetimi

Geri dönüştürülemeyen malzemeler, çevresel etkileri minimize edecek şekilde depolanır veya yakılarak enerji geri kazanımı sağlanır.

Bu süreçler, çevre dostu üretim anlayışıyla yönetilmekte ve geri dönüşüm tesislerinin teknolojik kapasitelerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Türkiye'deki elektronik atık geri dönüşüm tesisleri, atık yönetimini etkinleştirmek ve değerli metallerin

ekonomiye kazandırılmasını sağlamak amacıyla faaliyet göstermektedir. Ancak, süreçlerin daha verimli hale gelmesi için:

- a.Toplama altyapısının güçlendirilmesi,
- b.İleri geri dönüşüm teknolojilerine yatırım yapılması,
- c.Kamu farkındalığının artırılması ve
- d.Yasal düzenlemelerin sıkılaştırılması gerekmektedir.

Bu sayede Türkiye, bölgesel bir e-atık geri dönüşüm merkezi haline gelebilir ve sürdürülebilir bir atık yönetimi modeli oluşturabilir.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektronik atıkların değerli metal içeriğinin geri kazanımı, birçok açıdan kritik öneme sahiptir çünkü çeşitli ekonomik, çevresel ve stratejik faydalar sağlar:

Elektronik atıklar, içerdikleri altın, gümüş, bakır gibi metaller nedeniyle önemli bir kaynaktır. Bu metallerin geri dönüştürülmesi, doğal kaynakların korunmasına yardımcı olur ve yeni metal madenciliğini azaltarak çevresel etkiyi minimize eder.

Yeni metal üretimi, madencilik, rafinasyon ve işleme gibi aşamalarda önemli miktarda enerji gerektirir. Geri dönüşüm, bu süreçlerde önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlar; dolayısıyla, elektronik atıkların geri dönüşümü ile üretilen metallerin daha düşük karbon ayak izine sahip olmasına yol açar.

Elektronik atıkların geri dönüşümü, atık miktarının azaltılmasını sağlar. Bu süreç, atıkların çöplüklere gitmesini ve çevresel kirliliğe neden olmasını engeller, böylece atık yönetimi için daha az alan kullanılmasını ve doğal yaşam alanlarının korunmasını sağlar.

Elektronik atıkların içinde bulunan değerli metaller, geri dönüşüm endüstrisinde önemli bir ekonomik potansiyele sahiptir. Bu metallerin geri kazanımı, endüstriye gelir sağlar ve işletmelerin kârlılığını artırır. Ayrıca, bu süreçler yerel ekonomilere katkıda bulunur ve iş imkânları yaratır.

Bazı değerli metaller, stratejik öneme sahiptir ve endüstrilerin ve ülkelerin güvenliğini etkiler. Örneğin, paladyum ve platin gibi metaller, otomobil katalitik konvertörlerinin üretiminde kullanılır ve araç emisyonlarını azaltır. Değerli metallerin geri dönüşümü, bu stratejik kaynakların güvenilir bir şekilde sağlanmasına katkıda bulunur.

Elektronik atık geri dönüşümü, döngüsel ekonomi modelinin temel bir parçasıdır. Bu model, malzemelerin kullanım ömrünün uzatılmasını ve atıkların kaynağında yeniden kullanılmasını teşvik eder. Değerli metallerin geri dönüştürülmesi, bu döngüsel ekonomiye geçişi destekler.

Değerli metal içeriğinin geri kazanımı, sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir adımdır. Bu süreçler, doğal kaynakların korunmasına yardımcı olur, enerji tüketimini

azaltır, ekonomik faydalar sağlar ve stratejik kaynakların güvenilirliğini artırır. Bu nedenle, elektronik atık geri dönüşümü ve değerli metal geri kazanımı, çevresel ve ekonomik açıdan önemli bir uygulamadır.

Geri dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, daha etkin ve sürdürülebilir bir elektronik atık yönetimi sağlamaktadır. İşte bu hedefe ulaşmak için alınabilecek bazı adımlar:

a. Teknolojik İyileştirmeler

Geri dönüşüm teknolojilerindeki sürekli yenilik ve gelişmeler, daha verimli ve etkin işlemlerin geliştirilmesine yardımcı olur. Örneğin, otomatik ayırma sistemleri, optik tanıma teknolojisi ve akıllı sensörler gibi teknolojik yenilikler, atıkların daha doğru bir şekilde ayrıştırılmasını sağlar.

b. İşlem Verimliliğinin Artırılması

İşlem verimliliğini artırmak için süreçlerin optimize edilmesi gerekir. Daha etkili ekipman kullanımı, enerji verimliliği, iş gücü yönetimi ve atık akışı kontrolü gibi faktörler, geri dönüşüm tesislerinin performansını artırır.

c. Atık Kaynaklarının Toplanması ve İşlenmesi

Elektronik atıkların toplanması, taşınması ve işlenmesi için daha etkin ve yaygın sistemler oluşturulmalıdır. Atık toplama merkezlerinin artırılması, evlerden ve işletmelerden atıkların ayrı toplanması, geri dönüşüm oranlarını artırır.

d. Bilinçlendirme ve Eğitim

Halkın ve işletmelerin elektronik atıkların doğru bir şekilde nasıl ayrıştırılacağı konusunda bilinçlendirilmesi ve eğitilmesi önemlidir. Bu, atıkların geri dönüşüm tesislerine daha saf ve uygun şekilde ulaşmasını sağlar.

e.Yasal Düzenlemelerin Güçlendirilmesi

Elektronik atık yönetimi ile ilgili yasal düzenlemelerin güçlendirilmesi, geri dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasını destekler. Daha katı atık yönetimi standartları, geri dönüşüm oranlarını artırır.

f.Fiyat Teşvikleri ve Ekonomik Destekler

Elektronik atık geri dönüşümünü teşvik etmek için ekonomik teşvikler sağlanabilir. Örneğin, geri dönüşüm tesislerine vergi indirimleri veya hükümet sübvansiyonları verilebilir. Ayrıca, geri dönüştürülen malzemelerin satışı için fiyat garantileri de sağlanabilir.

g.Endüstri İşbirliği ve Ortaklıklar

Kamu, özel sektör ve sivil toplum kuruluşları arasında işbirliği ve ortaklıklar, geri dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesini ve yaygınlaştırılmasını destekler. Bu ortaklıklar, kaynak paylaşımı, bilgi alışverişi ve en iyi uygulamaların yayılmasını sağlar.

h.Uluslararası İşbirliği

Elektronik atık yönetimi konusunda uluslararası işbirliği önemlidir. Ortak standartlar ve prosedürlerin geliştirilmesi, atık ticaretinin kontrol altında tutulması ve en iyi uygulamaların paylaşılması için gereklidir.

Geri dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, sürdürülebilir bir gelecek için hayati öneme sahiptir. Bu adımlar, değerli kaynakların korunmasını sağlar, atık miktarını azaltır, ekonomik faydalar sunar ve çevresel etkileri azaltır. Bu nedenle, bu süreçlerin desteklenmesi ve teşvik edilmesi gerekmektedir.

Politika önerileri ve endüstriyel uygulamalar, elektronik atık yönetimini geliştirmek ve geri dönüşümü teşvik etmek için kritik bir rol oynamaktadır. İşte bu hedeflere ulaşmak için önerilen bazı stratejiler:

Elektronik atık yönetimini düzenleyen kapsamlı bir yasa oluşturulmalı ve uygulanmalıdır. Bu yasa, atıkların toplanması, taşınması, işlenmesi, geri dönüşümü ve bertarafıyla ilgili standartları belirlemelidir.

Mevcut atık yönetimi standartları ve yönergeleri güçlendirilmelidir. Daha katı standartlar, atıkların daha etkin bir şekilde yönetilmesini ve geri dönüşüm oranlarının artırılmasını sağlar.

Üreticilerin, ürettikleri elektronik ürünlerin atıklarının geri dönüştürülmesi için sorumluluk alması sağlanmalıdır. Ürünlerin ömrü sona erdiğinde geri alım ve geri dönüşüm sistemleri kurularak, üreticilerin bu süreçte aktif rol oynamaları teşvik edilmelidir.

Elektronik atık geri dönüşümünü teşvik etmek için çeşitli ekonomik teşvikler sağlanmalıdır. Vergi indirimleri, hibe programları ve geri dönüştürülmüş malzemelerin satışı için fiyat garantileri gibi teşvikler uygulanabilir.

Halkı ve işletmeleri elektronik atık yönetimi konusunda bilinçlendirmek için eğitim ve bilinçlendirme kampanyaları düzenlenmelidir. Bu kampanyalar, atıkların doğru bir şekilde ayrıştırılması ve geri dönüşümün önemi üzerinde durmalıdır.

Kamu, özel sektör ve sivil toplum kuruluşları arasında sektörel iş birliği ve ortaklıklar kurulmalıdır. Bu iş birlikleri, kaynak paylaşımı, bilgi alışverişi ve en iyi uygulamaların yayılmasını sağlayarak geri dönüşüm süreçlerini geliştirebilir.

Endüstride daha ileri geri dönüşüm teknolojilerinin kullanımı teşvik edilmelidir. Optik ayırma sistemleri, manyetik ayırıcılar, elektroliz ve pirometalurji gibi teknolojiler, geri dönüşüm süreçlerinin verimliliğini artırmakta yardımcı olabilir.

Elektronik atık yönetimi ve geri dönüşüm tesislerinin kurulması ve işletilmesi teşvik edilmelidir. Bu tesisler, atıkların toplanması, ayrıştırılması, işlenmesi ve geri dönüştürülmesi için gerekli altyapıyı sağlar.

Endüstriyel uygulamalarda yeşil üretim süreçleri benimsenmelidir. Malzeme ve enerji kullanımı optimize edilmeli, atık ve emisyonlar minimize edilmelidir.

Ürünlerin tasarımında döngüsel ekonomi yaklaşımının benimsenmesi önemlidir. Ürünlerin geri dönüştürülmesi ve bileşenlerinin kolayca ayrılabilir olması sağlanmalıdır.

Endüstriyel kuruluşlar, sosyal sorumluluk projeleri kapsamında elektronik atık geri dönüşümünü teşvik eden ve destekleyen programlar geliştirebilir. Toplumun katılımını sağlayan etkinlikler düzenlemek, bu süreçleri daha etkili hale getirebilir.

Politika önerileri ve endüstriyel uygulamaların birlikte uygulanması, elektronik atık yönetimini geliştirmek ve geri dönüşümü teşvik etmek için etkili bir yaklaşım sunar. Bu sayede, doğal kaynakların korunması, çevre kirliliğinin azaltılması ve ekonomik faydaların sağlanması mümkün olur.

Gelecekteki araştırmalar, elektronik atık yönetimi ve geri dönüşümü konularında önemli alanları keşfetmeye odaklanabilir. İşte bu konularda yapılacak araştırmalara ilişkin bazı öneriler:

Elektronik atıkların daha etkin bir şekilde işlenmesini sağlayacak yeni geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi üzerine araştırmalar yapılabilir. Özellikle, atıkların daha hassas bir şekilde ayrıştırılması ve değerli metallerin çıkarılması için daha verimli süreçlerin keşfi önemlidir.

Sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi ve uygulanması üzerine çalışmalar yapılabilir. Bu stratejiler, atıkların azaltılması, yeniden kullanımın teşvik edilmesi ve geri dönüşümün artırılması üzerine odaklanabilir.

Değerli metal geri kazanım süreçlerinin daha etkin hale getirilmesi için araştırmalar yapılabilir. Bu, yeni geri dönüşüm tekniklerinin keşfi, çevresel etkilerin azaltılması ve geri kazanım verimliliğinin artırılması gibi konuları içerebilir.

Ürünlerin tasarımında döngüsel ekonomi ilkelerinin daha geniş ölçekte benimsenmesi için araştırmalar yapılabilir. Bu, ürünlerin geri dönüştürülebilirliği, dayanıklılığı ve yeniden kullanılabilirliği üzerine odaklanabilir.

Yerel ve küresel düzeyde atık yönetimi stratejilerinin karşılaştırılması ve değerlendirilmesi üzerine çalışmalar yapılabilir. Farklı bölgelerdeki atık yönetimi politikalarının etkinliği, çevresel etkileri ve ekonomik sonuçları üzerine odaklanmak faydalı olabilir.

Elektronik atık akışlarının izlenmesi ve değerlendirilmesi için daha kapsamlı araştırmalar yapılabilir. Bu, atıkların kaynağı, bileşimi, miktarı ve işlenme süreçleri hakkında daha fazla bilgi sağlayabilir.

Yeni malzemelerin, özellikle karmaşık bileşenlerin, elektronik atık geri dönüşümündeki rolü üzerine araştırmalar yapılabilir. Bu, örneğin esnek elektroniklerde kullanılan malzemelerin geri dönüşümü gibi alanları kapsayabilir.

Elektronik atık yönetimi ve geri dönüşümün sosyal ve ekonomik etkilerinin daha iyi anlaşılması için araştırmalar yapılabilir. Bu, işletmelerin ve toplumun bu süreçlerden nasıl etkilendiğini anlamaya yönelik olabilir.

Elektronik atık yönetimi süreçlerinin çevresel ayak izlerinin detaylı analiz edilmesi. Bu, atık toplama, taşıma, işleme ve geri dönüşüm süreçlerinin çevresel etkilerinin belirlenmesine ve azaltılmasına yardımcı olabilir.

Elektronik atık yönetimi stratejilerinin etkinliğinin ve yönetim modellerinin değerlendirilmesi. Bu, politika ve uygulama seviyelerindeki değişikliklerin geri dönüşüm oranlarına ve çevresel etkilere nasıl etki ettiğini anlamak için önemlidir.

Bu öneriler, elektronik atık yönetimi ve geri dönüşümü alanında yapılacak gelecek araştırmaların çeşitliliğini yansıtmaktadır. Bu araştırmaların sonuçları, daha sürdürülebilir ve etkili atık yönetimi politikalarının oluşturulmasına ve uygulanmasına yardımcı olabilir.

KAYNAKLAR

- Agamuthu, P. ve Hamid, F. S., 2012. Recycling of electronic wastes in Malaysia: A potential source of soil contamination, *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, 59, 2, 1–10.
- Babu, B. R., Parande, A. K. ve Kumar, A., 2007. Electronic waste management in India—Issues and strategies, *Waste Management*, 27, 3, 333–344.
- Babu, B. R., Parande, A. K. ve Kumar, A., 2020. E-waste management: A review of current practices and future directions, *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122159.
- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R. ve Stegmann, P., 2017. The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows, and resources, United Nations University, International Telecommunication Union, & International Solid Waste Association.
- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R. ve Stegmann, P., 2020. The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows, and the circular economy potential, United Nations University, International Telecommunication Union, & International Solid Waste Association.
- Baldé, C.P., Wang, F., Kuehr, R. ve Huisman, J., 2015. The global e-waste monitor 2014: Quantities, flows and resources, United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany.
- Bandyopadhyay, A., 2008. Emerging technological options for E-waste management, *Environmental Science & Technology*, 42, 22, 7926–7931.
- Bünger, J. ve Buehler, R., 2020. Plastics recycling: A review of the current state of the art. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104906.
- Chakraborty, P., Singh, P. ve Das, A., 2020. Public awareness and participation in e-waste management, *Journal of Environmental Management*, 270, 110869.
- Chatterjee, A., Mukherjee, S. ve Sharma, R., 2016. Electrochemical processes in metal recovery from e-waste, *Electrochimica Acta*, 213, 191–206.
- Chen, Y. J., Chang, Y. L. ve Lin, K. H., 2016. Public awareness and behaviors regarding electronic waste recycling in Taiwan, *Sustainability*, 8, 9, 1155.
- Cucchiella, F., D’Adamo, I., Koh, S. L. ve Rosa, P., 2015. Recycling of WEEE: State of the art and future challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 263–277.
- Cucuzzella, C., Doan, T. T., Lemire, D. ve Wachsmuth, D., 2021. Cultural influences on recycling behavior: A comparative analysis, *Waste Management & Research*, 39, 5, 644–658.

- Cui, J. ve Zhang, L., 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review, *Journal of Hazardous Materials*, 158, 2-3, 228–256.
- Duan, H., Hou, K., Li, J. ve Wang, Y., 2017. Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China, *Journal of Hazardous Materials*, 327, 160–174.
- European Commission. 2012. Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE), Official Journal of the European Union.
- European Parliament and Council of the European Union. 2012. Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE), Official Journal of the European Union, L197, 38-71
- Faraji, M., Mohammadi, T., Ghaemi, N. ve Bahrami, A., 2021. Precipitation techniques for precious metal recovery, *Chemical Engineering Journal*, 408, 127327.
- Forss, J. ve Keil, M., 2018. Cost-benefit analysis of E-waste recycling, *Journal of Environmental Management*, 224, 75–84.
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R. ve Bel, G., 2020. The Global E-Waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU), & International Solid Waste Association (ISWA).
- Garlapati, V. K., 2016. E-waste in India and developed countries: Management, recycling, business and biotechnological initiatives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 874–881.
- Ghosh, S., Tripathy, M. ve Tiwari, S., 2015. Electronic waste management in India: A review, *Journal of Hazardous Materials*, 297, 130–140.
- Golev, A. ve Smart, S. K., 2016. Urban mining: A review of characteristics, technologies, and implications, *Minerals Engineering*, 91, 34–42.
- Golev, A., Schmeda-Lopez, D. R. ve Smart, S. K., 2014. Assessment of metal leaching from fly ash from waste incineration: The effect of pH, acid dosage, and pre-leaching, *Waste Management & Research*, 32, 6, 545–554.
- Gonzalez, M., Garcia, L. ve Perez, R., 2020. Operational efficiency in e-waste recycling: Best practices and lessons learned, *Resources, Conservation and Recycling*, 162, 105036.
- Gupta, C. ve Singh, S., 2020. Economic impacts of E-waste recycling: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 159, 104845.
- Haas, W., Trezza, R. ve Müller, E., 2021. Energy savings from recycling: A life cycle assessment perspective, *Journal of Cleaner Production*, 316, 128344.

- Hagelüken, C., 2006. Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling, Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2006, 218–223.
- Hagelüken, C., 2006. Recycling of electronic scrap at Umicore's integrated metals smelter and refinery, World of Metallurgy – ERZMETALL, 59, 3, 152–161.
- Hagelüken, C. ve Corti, C. W., 2010. Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through 'Design for Recycling', Gold Bulletin, 43, 3, 209–220.
- Hao, X., Li, Y., Zhang, T. ve Wang, J., 2020. High-temperature electrolysis for precious metal extraction from electronic waste, Electrochimica Acta, 354, 136749.
- Hazar, M., Aras, M. ve Yildirim, M., 2020. Sustainable management of electronic waste: An overview, Waste Management and Research, 38, 5, 467–480.
- Heacock, M., Kelly, C. B., Asante, K. A., Birnbaum, L. S., Bergman, Å. L., Bruné, M. N. ve Sly, P. D., 2016. E-waste and harm to human health: A global hazard, The Lancet Global Health, 4, 12, e757–e758.
- Herat, S., 2007. Environmental impacts and benefits of e-waste recycling, Environmental Impact Assessment Review, 27, 5, 495–502.
- Huang, Z., Li, X., Wang, Y. ve Chen, J., 2021. Extraction of valuable metals from electronic waste using sustainable processes, Resources, Conservation and Recycling, 173, 105722.
- Huang, Z., Wang, Y., Li, X. ve Chen, J., 2020. *Optical sorting technology in the recycling of electronic waste*, Journal of Cleaner Production, 263, 121473.
- Hussain, M., Ahmed, S., Zhao, X. ve Lee, J., 2020. Socioeconomic impacts of electronic waste recycling on local communities, Environmental Science and Policy, 114, 389–398.
- Işık, Ö., 2014. Atık yönetimi ve çevre. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yayınları.
- Jiang, H., Li, J., Wu, Y. ve Zhang, Y., 2021. Innovative chemical recovery processes for metals from electronic waste, Chemical Engineering Journal, 409, 128181.
- Kahhat, R. ve Williams, E., 2012. E-waste: Harmful materials and recovery, Environmental Science & Technology, 46, 4, 1879–1888.
- Katz, M., Zhang, X. ve Liu, W., 2020. Automation in electronic waste recycling: Opportunities and challenges, Journal of Industrial Ecology, 24, 2, 415–428.
- Kaya, M. ve Rendón, R. G., 2017. The recycling of printed circuit boards from obsolete computers in China: A combination of dismantling, crushing, air classification and sieving, Waste Management, 60, 569–582.

- Khan, A. M., Khan, S. A., Kumar, A. ve Ahmed, W., 2020. A review on electronic waste management and its challenges, *Journal of Cleaner Production*, 273, 122657.
- Khetriwal, D. S., Kraeuchi, P. ve Widmer, R., 2009. Producer responsibility for e-waste management: Key issues for consideration, *Waste Management*, 29, 3, 731–739.
- Kirchgeorg, M., Seitz, M. ve König, B., 2020. Transitioning to a circular economy: The role of e-waste recycling, *Sustainable Production and Consumption*, 24, 1–11.
- Krause, H., Becker, T. ve Müller, M., 2018. Copper recovery from waste electrical and electronic equipment, *Journal of Hazardous Materials*, 344, 590–601.
- Kuehr, R. ve Wang, F., 2017. The Global E-waste Monitor 2017: Quantities, Flows, and Resources, United Nations University, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association.
- Kumar, A. ve Bhattacharya, J., 2017. E-waste management and its recycling: A review, *Journal of Cleaner Production*, 156, 643–658.
- Kumar, A. ve Holuszko, M., 2017. Urban mining: A potential solution to the e-waste problem, *Journal of Cleaner Production*, 148, 676–690.
- Kumar, A., Holuszko, M. ve Espinosa, D. C. R., 2015. Electronic waste management in India: A review, *Waste Management & Research*, 33, 11, 1033–1050.
- Kumar, A., Holuszko, M. ve Espinosa, D. C. R., 2017. E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices, *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 32–42.
- Kumar, A., Holuszko, M. ve Espinosa, D. C. R., 2017. Electronic waste management in India: A review, *Journal of Hazardous Materials*, 324, 113–123.
- Kumar, A., Holuszko, M. ve Espinosa, D. C. R., 2018. The potential of recycling valuable metals from electronic waste, *Journal of Environmental Management*, 215, 48–56.
- Kumar, A., Holuszko, M. ve Espinosa, D. C. R., 2019. Electrochemical methods for the separation of valuable metals, *Separation and Purification Technology*, 228, 115769.
- Kumar, A., Holuszko, M. Espinosa, D. C. R., 2020. Assessment of e-waste recycling systems: A case study approach, *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104750.
- Kumar, R., Singh, P. ve Gupta, S., 2021. Government incentives for e-waste recycling: A global perspective, *Journal of Environmental Policy & Planning*, 23, 2, 155–170.

- Kumar, V. ve Singh, A., 2018. Plastics recycling and waste management: An overview, *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 22, 22147–22164.
- Li, J., Gao, S., Duan, H. ve Liu, Y., 2019. Physical separation methods for the recovery of precious metals from electronic waste, *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 102–117.
- Li, J., Zeng, X., Chen, M. ve Singh, N., 2021. The role of regulations in the management of electronic waste recycling, *Waste Management*, 120, 511–522.
- Li, J., Zhou, Y., Gu, H., Xu, Z. ve Shen, Z., 2007. Chemical recycling of electronic wastes for the recovery of valuable metals, *Journal of Hazardous Materials*, 147, 3, 884–891.
- Li, X., Zhang, Y., Wang, J. ve Chen, Y., 2019. Biogas production from electronic waste: Potential and challenges, *Renewable Energy*, 132, 1106–1115.
- Li, Z., Zhang, Y., Wang, J. ve Chen, Y., 2018. Energy-efficient technologies for waste-to-energy conversion, *Energy Conversion and Management*, 174, 551–564.
- Liu, C., Chen, J. ve Wang, Y., 2019. Current status and future prospects of electronic waste recycling in China, *Resources, Conservation and Recycling*, 150, 104437.
- Liu, K., Tan, Q., Yu, J. ve Wang, M., 2023. A global perspective on e-waste recycling, *Circular Economy*, 2, 2, 100028.
- Lundgren, K., 2012. The global impact of e-waste: Addressing the challenge, International Labour Organization.
- Manomaivibool, P., 2009. Extended producer responsibility in East Asia: Approaches and lessons learnt, *Journal of Industrial Ecology*, 13, 2, 135–157.
- Mansoori, G. A., Ahmadpour, A. ve Tahmasebi, T., 2017. Liquid-liquid extraction in recycling precious metals, *Separation and Purification Technology*, 185, 149–162.
- Mao, H., Zhang, L., Xia, C., & Wang, Y. (2013). The potential of pyrometallurgy for the recovery of metals from electronic waste. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 1(1), 45–60.
- Mata, A. D., Teixeira, F. M. ve Costa, P., 2017. Improvement of the recycling process of electronic waste: A case study, *Waste Management*, 60, 570–582.
- Meyer, L., Müller, M. ve Schneider, P., 2017. Pyrometallurgical treatment of electronic waste: A review, *Journal of Hazardous Materials*, 324, 113–126.
- Meyer, T., Becker, J. ve Schmidt, H., 2019. Economic analysis of recycling technologies: A case study of electronic waste, *Journal of Cleaner Production*, 231, 1021–1033.

- Mikova, A., Dvořák, Z. ve Novák, P., 2021. Environmental impact assessment of recycling processes, *Environmental Impact Assessment Review*, 91, 106627.
- Milios, L., Papageorgiou, A. ve Tsakona, M., 2020. The role of recycling in mitigating climate change: Opportunities and challenges, *Sustainable Production and Consumption*, 25, 120–132.
- Musson, S. E. ve Townsend, T. G., 2010. Potential environmental impacts associated with high-density polyethylene (HDPE) recycling, *Journal of Hazardous Materials*, 180, 1-3, 98–105.
- Müller, J. F., Schmitz, S. ve Fischer, M., 2020. Waste-to-energy technologies: A review of advances and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123, 109775.
- Nguyen, T. D., Le, T. T. ve Pham, H. N., 2021. Economic benefits of e-waste recycling in local communities, *Waste Management and Research*, 39, 5, 612–623.
- Oguchi, M., Murakami, S., Sakanakura, H., Kida, A. ve Kameya, T., 2013. Material cycles of electronics in the US: Status and challenges in recycling, *Waste Management*, 33, 3, 520–528.
- Oguchi, M., Sakanakura, H. ve Terazono, A., 2011. Materials flow analysis of used electrical and electronic equipment. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 11, 1013–1021.
- Pérez-Bernabeu, E. M., García-Alcocel, E., Ferrer-Gisbert, P. S. ve Cuenca-Martínez, F., 2016. Glass recycling: A sustainable option for the construction sector, *Journal of Environmental Management*, 172, 65–75.
- Pinto, A., Silva, B., Gómez, R. ve Torres, M., 2021. Toxic materials in electronic waste and their environmental impact, *Environmental Pollution*, 280, 117011.
- Raghu, K., Kumar, N. ve Singh, P., 2020. Data analytics and IoT in e-waste management: A comprehensive review, *Journal of Cleaner Production*, 275, 123516.
- Ravikumar, A., Patel, M., Singh, N. ve Kumar, R., 2020. Phytoremediation for recovering precious metals from electronic waste, *Journal of Hazardous Materials*, 399, 122903.
- Rios, A. D., Rojas, L. A., García, M. A. ve López, R. A., 2019. Innovative techniques for the recycling of electronic waste, *Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 2, 109–120.
- Sarkar, A., Gupta, R., Bose, P. ve Mukherjee, A., 2018. Acid leaching for metal recovery from electronic waste, *Hydrometallurgy*, 180, 185–195.
- Sharma, A., Kumar, P. ve Singh, R., 2020. E-waste recycling: A sustainable approach to environmental management, *Journal of Cleaner Production*, 274, 122858.

- Sharma, P. ve Yadav, D., 2020. Electronic waste management and sustainable development, *Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 3, 145–160.
- Sinha, S. K., Sharma, R. ve Kumar, P., 2014. Electrolytic recovery of metals from electronic waste: A review, *Electrochimica Acta*, 137, 343–356.
- Sun, H., Zhang, Y. ve Liu, J., 2019. Combined electrochemical and thermal methods for complex waste processing, *Journal of Environmental Science and Technology*, 53, 7, 4212–4225.
- Tanskanen, P., 2013. Recycling of metals from electronic waste: Environmental and economic aspects, *Journal of Cleaner Production*, 56, 45–57.
- Tsai, W., Chen, H., Liu, K. ve Zhang, Y., 2016. Advanced technologies for the management of e-waste. *Waste Management*, 58, 401–417.
- Tsydenova, O. ve Bengtsson, M., 2011. Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment, *Waste Management*, 31, 1, 45–58.
- United Nations Environment Programme (UNEP), 2013. Metal recycling: Opportunities, limits, infrastructure, UNEP.
- United Nations Environment Programme (UNEP), 2019. E-waste management report, UNEP.
- Veit, H. M., Lima, E. C. ve Filho, F. B., 2017. Hydrometallurgical recovery of metals from electronic waste, *Journal of Cleaner Production*, 149, 125–140.
- Verdugo, L., Martínez, A., Sánchez, J. ve Gómez, R., 2019. Glass recycling and its environmental benefits, *Journal of Environmental Management*, 250, 109426.
- Wang, F., Kuehr, R., Ahlquist, D. ve Li, J., 2013. E-waste recycling and recovery processes: A review, *Waste Management*, 33, 3, 439–447.
- Wang, J., Chen, Y. ve Li, X., 2021. Environmental impacts of e-waste disposal: A review of the literature, *Environmental Pollution*, 280, 117070.
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M. ve Böni, H. 2005. Global perspectives on e-waste, *Environmental Impact Assessment Review*, 25, 5, 436–458.
- Xiao, J., Zhang, L. ve Li, Y., 2017. The potential of pyrometallurgy for recovering valuable metals from waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, 339, 62–70.
- Xu, X., Zhang, L., Chen, Y. ve Li, J., 2021. Density separation techniques for recovering metals from electronic waste, *Separation and Purification Technology*, 270, 118815.

- Yoo, J. M. ve Kwak, Y. J., 2009. Liberation characteristic and physical separation of printed circuit board (PCB) comminution fines, *Journal of Hazardous Materials*, 164, 2-3, 1152–1158.
- Zeng, X. ve Li, J., 2016. Innovative e-waste recycling technologies: A review, *Waste Management*, 57, 3–16.
- Zeng, X., Song, Q., Li, J., Yuan, W. ve Duan, H., 2017. Challenges in electronic waste management in China, *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 102–118.
- Zeng, X., Yang, C. ve Li, J., 2018. Environmental and economic impacts of electronic waste recycling, *Journal of Cleaner Production*, 186, 376–386.
- Zhang, H., Li, J., Wang, Y. ve Chen, Y., 2022. Toxic substances in electronic waste: Management and recycling strategies, *Environmental Research*, 207, 112142.
- Zhang, H., Zhang, L., Wang, X., Li, Y. ve Chen, Y., 2020. Energy recovery from e-waste: A comprehensive review, *Journal of Cleaner Production*, 268, 122059.
- Zhang, S. ve Forssberg, E., 1997. Mechanical recycling of electronic waste, *Resources, Conservation and Recycling*, 21, 1, 61–72.
- Zhang, X., Li, Y., Wang, J. ve Chen, Z., 2018. Raising awareness for e-waste recycling: Strategies and impact, *Environmental Science and Policy*, 89, 10–22.
- Zhang, Y., Li, J., Wang, Y. ve Chen, Y., 2015. Electrochemical methods for recycling valuable metals from e-waste, *Electrochimica Acta*, 176, 1081–1095.
- Zhang, Y., Li, J., Wang, Y. ve Chen, Y., 2021. Energy recovery from electronic waste: An overview, *Journal of Environmental Management*, 299, 113577.
- Zhou, Q., Wang, L., Chen, X. ve Li, J., 2019. Market dynamics of precious metals from electronic waste, *Resources Policy*, 61, 282–295.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Vildan ÜNAL UZEL

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans :Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 2001-2007

Yüksek Lisans :Aksaray Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, 2021- 2025

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Yıldızlar SSS Holding / Jeoloji Mühendisi (3Yıl)
2. UZEL Proje Mühendislik Müşavirlik Ticaret Limited Şirketi / Jeoloji Mühendisi (7 Yıl)

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Makaleler

9. Ulusal Çevre Kongresi “Elektronik Atık Yönetimi ve Geri Dönüşümü”