

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ATIK BASKILI DEVRE ELEMANLARINDAN
HİDROMETALURJİK YÖNTEM İLE DEĞERLİ METAL GERİ
KAZANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

MEHMET NAZIM ÖZDEMİRCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. MEHMET SALİM ÖNCEL

EKİM 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ATIK BASKILI DEVRE ELEMANLARINDAN
HİDROMETALURJİK YÖNTEM İLE DEĞERLİ
METAL GERİ KAZANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

MEHMET NAZIM ÖZDEMİRCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. MEHMET SALİM ÖNCEL

EKİM 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

FROM WASTE PRINTING CIRCUIT ELEMENTS
BY HYDROMETALLURGICAL METHOD
ASSESSMENT OF PRECIOUS METAL RECOVERY

MEHMET NAZIM ÖZDEMİRCAN

A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

ADVISOR: PROF. DR. MEHMET SALİM ÖNCEL

OCTOBER 2024



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 01/07/2024 tarih ve 2014/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 09/10/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mehmet Nazım ÖZDEMİRCAN'ın tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Mehmet Salim ÖNCEL

ÜYE

: Prof. Dr. Güleda ENGİN

ÜYE

: Prof. Dr. Elif İNCE

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu tez çalışmasında, atık baskılı devre kartlarından hidrometalurjik yöntemlerle değerli metal geri kazanımına odaklanılmaktadır. Tez, elektronik atıkların hızla artması ve bu atıkların çevreye ve insan sağlığına olan olumsuz etkileri nedeniyle, geri dönüşüm yöntemlerinin önemini vurgular. Baskılı devre kartları, elektronik cihazların temel bileşenleri arasında yer alır ve bakır, gümüş, altın, paladyum gibi değerli metallerin yanı sıra, kurşun ve kadmiyum gibi tehlikeli maddeler de içerir. Bu nedenle, bu metallerin geri kazanılması çevresel ve ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır. Çalışmanın amacı, atık baskılı devre kartlarından değerli metallerin geri kazanılabilirliğini artırmak için mevcut yöntemleri incelemek ve değerlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda, farklı geri dönüşüm yöntemleri araştırılmış ve hem çevre dostu hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir tekniklerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Tezde, baskılı devre kartlarından metal geri kazanımında hidrometalurjik yöntemlerin kullanılması ön plana çıkmıştır. Bu yöntem, özellikle bakır, çinko, kalay ve titanyum gibi metallerin geri kazanılmasında etkili olmuştur.

Çalışma kapsamında kullanılan Atık Baskılı Devre Kartları, 1990'lı yıllardan kalma masaüstü bilgisayarlardan temin edilmiştir ve özel bir firma aracılığıyla sağlanmıştır. Anakartlar, iki gruba ayrılarak Anakart-1 ve Anakart-2 olarak adlandırılmıştır. Bu ayırım, anakartların bileşenlerinin daha detaylı incelenebilmesi ve potansiyel geri kazanım süreçlerinin karşılaştırılması amacıyla yapılmıştır.

Çalışmada deneysel olarak uygulanan süreçler, anakartların parçalanması, manyetik ayırımı, boyut küçültme işlemleri ve ısıtma işlemlerini kapsamaktadır. Ardından, hidrometalurjik yöntemlerle metallerin ekstraksiyonu gerçekleştirilmiştir. XRF ve ICP-OES gibi analizlerle metallerin geri kazanım süreçleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, geri kazanılan metal miktarlarını ve verimliliklerini değerlendirmiş, bu yöntemlerin etkinliğini göstermiştir. Çalışmanın sonuç bölümünde, Atık baskılı devre kartlarından önemli miktarlarda bakır, çinko, kalay ve titanyum metallerinin geri kazanımının gerçekleştirildiği ve sürdürülebilir kaynak yönetimine katkı sağlayabileceği vurgulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: E-Atık, Baskılı Devre Kartı, Geri Kazanım, Metal, Bilgisayar.

ABSTRACT

In this thesis, the focus is on the recovery of precious metals from waste printed circuit boards by hydrometallurgical methods. The thesis emphasizes the importance of recycling methods due to the rapid increase in electronic waste and the negative effects of these wastes on the environment and human health. Printed circuit boards are among the basic components of electronic devices and contain precious metals such as copper, silver, gold, palladium, as well as hazardous substances such as lead and Decadium. Therefore, the recovery of these metals is of great importance from an environmental and economic point of view.

The aim of the study is to examine and evaluate the existing methods to increase the recoverability of precious metals from waste printed circuit boards. In line with this aim, different recycling methods have been researched and it has been aimed to develop both environmentally friendly and economically sustainable techniques. In the thesis, the use of hydrometallurgical methods in metal recovery from PCBs has come to the fore. This method has been especially effective in recovering metals such as copper, zinc, tin and titanium.

The Waste Printed Circuit Boards used in the study were obtained from desktop computers dating back to the 1990s and provided through Jul-based a private company. Motherboards are divided into two groups and are called Motherboard-1 and Motherboard-2. This distinction was made in order to examine the components of the motherboards in more detail and to compare the potential recovery processes.

The experimentally applied processes in the study cover the disintegration of motherboards, magnetic separation, size reduction processes and heat treatment stages. Then, extraction of metals was carried out by hydrometallurgical methods. The recovery processes of metals have been evaluated with analyses such as XRF and ICP-OES. The results evaluated the amount of metal recovered and their efficiency and showed the effectiveness of these methods. In the conclusion section of the study, it is emphasized that significant amounts of copper, zinc, tin and titanium metals have been recovered from waste printed circuits and can contribute to sustainable resource management.

Keywords: E-Waste, Printed Circuit Board, Recover, Metal, Computer.

TEŞEKKÜRLER

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini, anlayışını ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasındaki yolda bana ışık tutan ve çalışmam boyunca tüm süreçlerde yanımda olduğunu her zaman hissettiğim, bilgi ve tecrübelerini benimle her daim paylaşan değerli danışmanım Prof. Dr. Mehmet Salim Öncel'e teşekkürlerimi en içten dileklerle sunarım. Yüksek lisans eğitimim boyunca aktarmış oldukları değerli bilgi ve tecrübeleri için bölümde bulunan tüm değerli hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında her koşulda desteğini ve güler yüzünü hiç esirgemeyen Araştırma Görevlisi Halil Nurullah Oruç'a ve Laboratuvar çalışmalarında bilgisiyle ve tecrübesiyle her daim yol gösteren Öğretim Görevlisi Sinem Vural Yurtsever'e teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini her zaman hissettiğim beni yetiştiren annem ve babama, ve sürekli yanımda olan canım kardeşlerime, çalışmalarım sırasında anlayış ve destekleri için Milli Savunma Bakanlığı 41. Bakım Fabrika Müdürlüğünde İş arkadaşlarıma, çalışmam sırasında küçük veya büyük yardımını esirgemeyen herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜRLER	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİL DİZİNİ	xii
TABLO DİZİNİ	xiii

1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Hakkında	2
1.1.1. Amaç ve Hedefler	2
1.1.2. Metodoloji	3
1.1.3. Tez Yapısı	3
1.2. Sorunun Açıklaması	3
1.3. Çalışmanın Önemi	4
1.4. Kapsam ve Sınırlamalar	5
2. LİTERATÜR TARAMASI	6
2.1. Elektronik Atıklara Genel Bakış	6
2.1.1. Elektronik Atık ve Karakterizasyonu	6
2.2. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi	9
2.2.1. Dünya’da ve Avrupa Birliğinde AEEE Yönetimi	9
2.2.2. Ülkemizde AEEE Yönetimi	11
2.3. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Süreç	15
2.4. Baskılı Devre Kartları (BDK)	17
2.4.1. Baskılı Devre Kartlarının Temel Bileşenleri	19
2.4.2. Baskılı Devre Kartlarının Kimyasal İçerikleri	24
2.5. Baskılı Devre Kartlarının Başlıca Kullanım Alanları	25
2.5.1. Elektronik Cihazların Temel İnşa Taşı	25
2.5.2. İleri Teknoloji ve Minyatürizasyon	26
2.5.3. İletişim ve Bağlantı Teknolojileri	26
2.5.4. Güvenilirlik ve Performans	26
2.5.5. Prototipleme ve Üretim Kolaylığı	26
2.5.6. Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik	27
2.5.7. İnovasyon ve Endüstriyel Gelişme	27
2.5.8. İş birliği ve Küresel Entegrasyon	27
2.6. Atık Baskı Devre Kartlarının Çevresel Etkileri	28
2.7. Atık Baskı Devre Kartlarının Ekonomik Etkileri	29
2.8. Bazı Elektronik Atık Uygulamaları	30
2.9. E-Atıkların Geri Kazanımı için Yapılmış Bazı Çalışmalar	30
2.10. E-Atıklarda Bulunan Metallerin Geri Dönüşüm Yöntemleri	34
2.10.1. Fiziksel ve Mekanik İşlemler	34

2.10.2. Hidrometalurji	35
2.10.3. Pirometalurji	36
2.10.4. Biyo-hidrometalurji	36
3. MATERYAL VE METOT	38
3.1. Materyallerin Temini ve Hazırlanması	39
3.2. Materyallerin Fiziksel Ayrımı	39
3.2.1. Materyallerin Manyetik Ayrımı	41
3.2.2. Materyallerin Boyut Küçültmesi	42
3.3. Materyallere Isıl İşlem Uygulanması	42
3.4. Materyallerin Hidrometalurjik Reaksiyona Hazırlanması	44
3.4.1. Materyallerin Elek Analizi	44
3.5. XRF Analizleri	46
3.5.1. Bakır (Cu) Kullanımı	48
3.5.2. Kalay (Sn) Kullanımı	49
3.5.3. Çinko (Zn) Kullanımı	49
3.5.4. Titanyum (Ti) Kullanımı	49
3.5.5. Alüminyum (Al) Kullanımı	50
3.5.6. Anakart Yüzeyi İçin Yapılan Çalışma	51
3.6. Hidrometalurjik Yöntemler	52
3.7. Bulgular ve Tartışma	56
3.7.1. ICP-OES Analizi	56
3.7.2. Anakart-1 Numunelerinin Miktar Hesabı	59
3.7.3. Anakart-2 Numunesi Verim Hesabı	61
3.8. Maliyet Analizi	67
3.8.1. Anakart -1 Numunesinin Maliyet Verimliliği Hesaplaması	69
3.8.2. Anakart -2 Numunesinin Maliyet Verimliliği Hesaplaması	70
4. SONUÇLAR	72
KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	79
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR	80

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: Santigrat derece
\$	: Dolar
d/d	: devir/dakika
dk	: Dakika
g	: Gram
kg	: Kilogram
mL	: Mililitre
M	: Molarite
ppm	: Milyonda bir
Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
As	: Arsenik
Au	: Altın
Ba	: Baryum
Bi	: Bizmut
Be	: Berilyum
Cr	: Krom
Cd	: Kadmiyum
C _{gerçek}	: Metallerin konsantrasyonu
Cu	: Bakır
CuSO ₄	: Bakır sülfat
Fe	: Demir
Ga	: Galyum
Hg	: Cıva
H ₂ SO ₄	: Sülfürik asit
H ₂ O ₂	: Hidrojen peroksit
HNO ₃ +3HCl	: Kral Suyu
HNO ₃	: Nitrik asit
I	: İyodür
Li	: Lityum
Ni	: Nikel
Pb	: Kurşun
Pd	: Paladyum
Pt	: Platin
Sb	: Antimony
Se	: Selenyum
Sn	: Kalay
Ti	: Titanyum
Zn	: Çinko
ZnS	: Çinko Sülfür
AB	: Avrupa Birliği
ABDK	: Atık Baskılı Devre Kartları
AEEE	: Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlar
AGP	: Gelişmiş Grafik Portu
BA	: Bromlu Alev Geciktiriciler
CPU	: İşlemci
CRT	: Katot ışın tüpleri

EEE	: Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlar
E-ATIK	: Elektronik Atık
GPU	: Grafik Kartı
IC	: Entegre Devreler
ICP-OES	: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy
ISA	: Eski Veri Yolu Portu
LCD	: Sıvı Kristal Ekran
LME	: Londra Metal Endüstrisi
OECD	: Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
PCB	: Printed-Circuit Board (Baskılı Devre Kartı)
PCI	: Çevresel Bileşen Ara Bağlantısı
PSU	: Güç Kaynağı
RAM	: Bellek
RoHS	: Restriction of Hazardous Substances
SATA	: Sabit diskler
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopisi
TAIEX	: Avrupa Birliği Teknik Destek Programı
TCMB	: Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası
TL	: Türk Lirası
UNDP	: Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı
UNEP	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UNU	: Birleşmiş Milletler Üniversitesi
WEEE	: Waste Electrical and Electronic Equipment
WPCB	: Waste Printed-Circuit Board (Atık Baskı Devre Kartı)
XRF	: X-Ray Floresansı

ŞEKİL DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: E-atık miktarlarının 2014 - 2030 yıllarına ait değişim tahmini.	2
Şekil 2.1: Dünyadaki bazı ülkelerin 2016 yılına ait AEEE üretim oranları.	6
Şekil 2.2: 20. YY başlarında EEE’lerde kullanılan başlıca kimyasal elementler.	7
Şekil 2.3: Günümüzde EEE’lerde kullanılan başlıca kimyasal elementler.	8
Şekil 2.4: EEE’lerin içerdiği bileşenlerin yüzde oranları.	9
Şekil 2.5: AB ve Türkiye’de AEEE ile ilgili mevzuat tarihçesi.	11
Şekil 2.6: E-atık toplama kutuları ve konteynerleri.	16
Şekil 2.7: Baskılı devre kartları.	19
Şekil 2.8: Anakart ve bileşenleri.	23
Şekil 3.1: Deneysel çalışmaların aşamaları.	38
Şekil 3.2: Anakart-1 ve Anakart-2 numuneleri.	39
Şekil 3.3: Anakart-1 ve Anakart-2 numunelerinden sökülen malzemeler.	40
Şekil 3.4: Bileşenlerinden ayrılmış anakart numunesi.	41
Şekil 3.5: Boyutları küçültülen Anakart-1 ve Anakart-2 numuneleri.	42
Şekil 3.6: (a) Isıl işlem anı-1,(b) Isıl işlem anı-2 ve (c) Isıl işlem sonrası.	43
Şekil 3.7: Isıl işleme tabi tutulan anakart numuneleri.	43
Şekil 3.8: Havan yardımıyla boyutları küçültülen numuneler.	44
Şekil 3.9: Anakart-1 ve Anakart-2 numunelerine ait metal tozları.	45
Şekil 3.10: Numunelerin reaksiyon işlemi.	54
Şekil 3.11: Numunelerin kaba filtreden süzme işlemi.	56

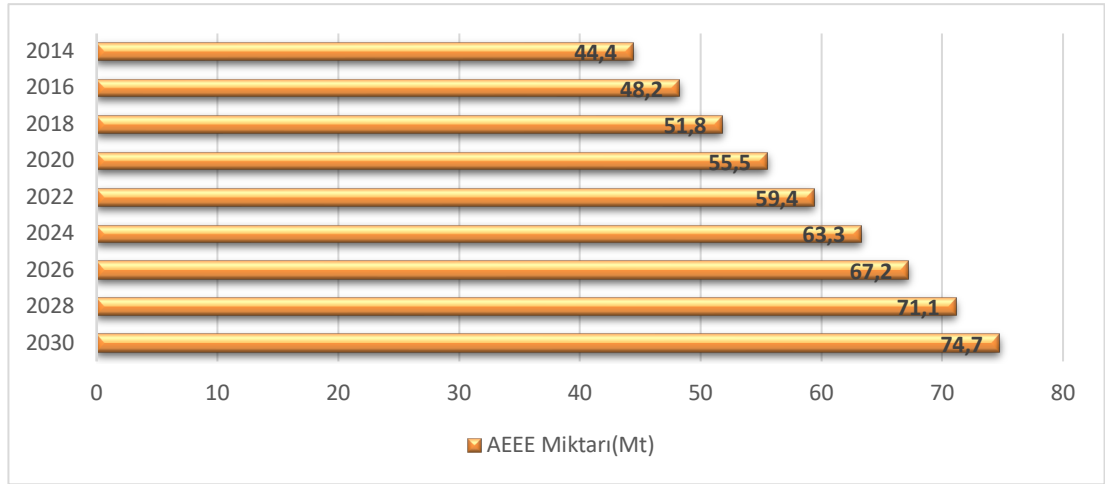
TABLO DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği EK A-B.	13
Tablo 2.2: Başlıca E-atıklardaki baskılı devre elemanlarının zararlı metal içeriği.	24
Tablo 2.3: Başlıca E-atıklardaki baskılı devre elemanlarının yaygın metal içeriği.	25
Tablo 2.4: Başlıca E-atıklardaki baskılı devre elemanlarının değerli metal içeriği.	25
Tablo 2.5: E-atıkların içerdiği doğaya zararlı maddelerin bulundukları bileşenler.	29
Tablo 3.1: Anakart-1 numunesine ait devre elemanlarının ilk tartım sonuçları.	40
Tablo 3.2: Anakart-2 numunesine ait devre elemanlarının ilk tartım sonuçları.	41
Tablo 3.3: Isıl işlem sonrası Anakart-1 numunelerine ait hassas tartım sonuçları.	46
Tablo 3.4: Isıl işlem sonrası Anakart-2 numunelerine ait hassas tartım sonuçları.	46
Tablo 3.5: Anakart-1 numunesi ait XRF analiz sonuçları.	47
Tablo 3.6: Anakart-2 numunesi ait XRF analiz sonuçları.	48
Tablo 3.7: Anakart yüzey numunesine ait analiz sonucu.	51
Tablo 3.8: Atık baskılı devre kartı numune içerikleri.	52
Tablo 3.9: Kimyasalların listesi.	52
Tablo 3.10: Kullanılan malzemelerin listesi.	52
Tablo 3.11: Anakart-1 numunesine ait ICP-OES analiz sonuçları.	57
Tablo 3.12: Anakart-2 numunesine ait ICP-OES analiz sonuçları.	57
Tablo 3.13: Anakart numunelerinden geri kazanılan metal miktarları.	63
Tablo 3.14: Kullanılan kimyasalların maliyetleri.	68
Tablo 3.15: Anakart başına geri kazanımı gerçekleştirilen metal ortalamaları.	68
Tablo 3.16: LME metal fiyatları ve TCMB verileri.	69
Tablo 3.17: Anakart-1 numunesine ait maliyet giderleri	69
Tablo 3.18: Anakart-2 numunesine ait maliyet giderleri.	70

1.GİRİŞ

Teknolojik yeniliklerin hız kesmeden devam etmesi, elektronik ürünlerin yaşam döngüsünü önemli ölçüde kısaltmıştır. Bunun yanı sıra, hızlı pazar penetrasyonu ve planlı eskime, insanların elektronik cihazlara yönelik daha yüksek taleplerde bulunmasına ve gereksinimlerinin artmasına yol açmaktadır, bu da çok sayıda ev aleti ve elektronik ürünün atılmasına neden olmaktadır [Ghosh vd., 2015.] Elektronik endüstrisindeki teknolojik değişiklikler ile birlikte, elektrikli ve elektronik cihazların modası hızla değişmekte buna paralel olarak ise ürünlerin kullanım süreleri giderek düşmektedir. Elektronik ürünlerin bozulması, kırılması, özelliklerinin yetersiz kalması gibi nedenlerle ömrünü dolduran ve atıl duruma düşen elektrik-elektronik ürünler/malzemeler (buzdolabı, telefon, bilgisayar, vb.), sahipleri tarafından atık sınıfına düşürülmektedir. Atığa ayrılan elektrik-elektronik cihazların oluşturduğu atıklar, kısaca “atık elektrik-elektronik eşya (AEEE)” veya “elektronik atık (e-atık)” olarak tanımlanırlır [Yazıcı ve Deveci, 2011]. Dünya çapında elektronik cihazların hızla çoğalması ve kısa ömürlü olmaları, elektronik atıkların (e-atık) hızla artmasına neden olmuştur. E-atık, elektronik cihazların üretim, kullanım ve atık aşamalarında ortaya çıkan atıkları kapsar ve genellikle tehlikeli maddeler içerir. Bu atıkların yanlış yönetimi, ciddi çevresel kirliliğe ve insan sağlığına zarar vermekte, aynı zamanda değerli kaynakların israfına yol açmaktadır. Elektronik atıkların önemli bir bileşeni olan baskılı devre kartları, içerdikleri değerli metaller nedeniyle geri dönüştürülmektedir. Baskılı devre kartları, elektronik cihazların temel yapıtaşlarından biridir ve elektrik akımının iletilmesini sağlar. Baskılı devre kartları, genellikle bakır, gümüş, altın ve paladyum gibi değerli metallerin yanında çeşitli tehlikeli maddeler içerirler. Bu nedenle, doğru yöntemlerle geri dönüştürülmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemlidir.

İstatistiklere göre, 2016 yılında küresel e-atık üretimi yaklaşık 48,2 milyon ton olarak hesaplandı ve bu da yaklaşık 4772 Eyfel kulesine eşdeğerdir. Küresel e-atık üretiminin 2030 yılına kadar 74,7 milyon tona çıkacağı tahmin edilmektedir Dünya çapında üretilen e-atık miktarının yıllara göre dağılımı Şekil 1.1’de gösterilmektedir [Baldé vd., 2017].



Şekil 1.1: E-atık miktarlarının 2014 - 2030 yıllarına ait değişim tahmini.

Hemen hemen tüm EEE'lerin (Elektrikli ve Elektronik Eşya) kritik bir parçası olan baskılı devre kartları (BDK'ler), EEE'de yaygın olarak bulunur. Son yıllarda, dünya çapında BDK üretiminin ortalama oranı %8,7 artmıştır [Huang vd., 2009]. BDK'ler, taşınabilir cihazlardan (cep telefonları, tabletler oyuncaklar vb.) büyük ölçekli cihazlara (televizyon, bilgisayar, araç vb.) kadar çoğu elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ekonominin hızlı gelişimi ile birlikte elektroniğin kullanım ömrü kısalmış, oluşan e-atıklarda önemli bir artışa neden olmuştur. Bu artış dolayısıyla, atık baskılı devre kartlarında artışını sağlamıştır.

1.1. Tez Hakkında

1.1.1. Amaç ve Hedefler

Bu tezin amacı, atık BDK'lerden değerli metal (Cu, Ti, Zn, Sn) geri kazanımına yönelik farklı yöntemleri araştırmak ve değerlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda, aşağıdaki hedefler belirlenmiştir:

- Atık BDK'lerin bileşimini ve içerdikleri değerli metalleri incelemek.
- Değerli metal (Cu, Ti, Zn, Sn) geri kazanımı için yaygın olarak kullanılan mevcut yöntemleri araştırmak ve avantajlarını ve dezavantajlarını değerlendirmek.
- Atık BDK'lerden değerli metal (Cu, Ti, Zn, Sn) geri kazanımı için çevre dostu ve ekonomik alternatif yöntemleri araştırmak.
- Atık BDK'lerden değerli metal (Cu, Ti, Zn, Sn) geri kazanımına yönelik önerilerde bulunmak. Bu hedefler, tezin ilerleyen bölümlerinde detaylı olarak açıklanacaktır.

1.1.2. Metodoloji

Bu çalışmanın hedeflerini gerçekleştirmek için, literatür araştırması ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Literatür araştırması, atık BDK'lerden değerli metal geri kazanımına yönelik mevcut sürdürülebilir yöntemleri ve döngüsel ekonomi modellerini incelemeyi amaçlamıştır. Deneysel çalışmalar, farklı bakır geri kazanım yöntemlerini test etmeyi ve karşılaştırmayı, ayrıca atık BDK'lerin geri dönüştürülmesi için sürdürülebilir stratejiler geliştirmeyi hedeflemiştir. Deneysel çalışmalar, atık BDK'lerin parçalanması ve ekstraksiyonu, kimyasal ve fiziksel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1.1.3. Tez Yapısı

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm olan girişte, arka plan ve gerekçe, amaç ve hedefler, metodoloji ve tezin yapısı açıklanmıştır. İkinci bölüm olan literatür incelemesinde, atık BDK'lerin bileşimi, içerdikleri değerli metaller ve özellikleri konuları ele alınmıştır. Ayrıca, yaygın olarak kullanılan değerli metal geri kazanım yöntemleri ve bunların avantajları ve dezavantajları üzerinde durulmuştur. Üçüncü bölüm olan materyal ve metot kısmında, atık BDK'lerden değerli metal geri kazanımına yönelik çalışma ve bulunan bulgularla geri kazanımın hesaplamaları yapılmıştır. Dördüncü bölüm olan sonuç bölümünde ise çalışmanın genel değerlendirilmesi yapılmıştır.

1.2. Sorunun Açıklaması

Elektronik ürünlerin kullanımı, dünya genelinde hızla artmıştır ve bu trendin önümüzdeki yıllarda da devam etmesi beklenmektedir. Ancak, bu elektronik ürünlerin ömrü genellikle kısa olmakta ve tüketiciler yeni teknolojilere geçtikçe eski elektronik ürünleri saklamak veya atmak durumun kalmaktadır. Bu durum, dünya çapında önemli bir çevre sorununa yol açan e-atık miktarının artmasına sebep olmaktadır. E-atıklar, insan sağlığı ve çevre üzerinde potansiyel olarak zararlı etkilere sahip olan çeşitli kimyasallar içermektedir. Bununla birlikte, e-atıklardaki bileşenlerin geri dönüştürülmesi, değerli metallerin kaynaklarının korunmasına ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. E-atıkların önemli bir parçası, elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılan atık baskılı devre kartları

(ABDK'ler)dir. ABDK'ler, elektrik akımlarını taşıyan yollardan ve elektronik bileşenlerin monte edildiği alanlardan oluşmaktadır. Bununla birlikte ABDK'lerin geri dönüştürülmesi zorlu ve masraflı bir süreçtir ve çoğu zaman yanlış yöntemler kullanılmaktadır. Yanlış yöntemlerin kullanılması, çevreye ve insan sağlığına zarar veren kimyasalların yayılmasına neden olmaktadır. Bakır, ABDK'lerin önemli bir bileşenidir ve elektronik atıklardan geri kazanılan bakır miktarı, dünya çapında bakır kaynaklarının önemli bir kaynağı haline gelmiştir. Bakırın yanı sıra değişken miktarlarda değerli metallerde ABDK'lerin içinde bulunmaktadır. Bu değerli metallerin içinde önemli miktarlarda titanyum, çinko ve kalayda bulunmaktadır.

1.3. Çalışmanın Önemi

Elektronik ekipmanların hızla gelişmesi ve değişmesi, elektronik atıkların önemli bir bileşeni olan ABDK sayısındaki artışa neden olmuştur. ABDK'ler, elektronik cihazların en temel unsurlardan biridir, altın, gümüş bakır gibi değerli metaller içermektedir. Ancak, ABDK'lerin geri dönüşümü ve yeniden kullanımı, yüksek maliyetler ve karmaşıklıklar nedeniyle zorluklarla karşılaşmaktadır. Araştırmalar, dünya genelindeki elektronik atık miktarının her yıl arttığını göstermektedir. Örneğin, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından yapılan bir araştırmada, dünyada yılda 5 milyon ton elektronik atık üretildiği ve bu miktarın 2030 yılına kadar 75 milyon tona çıkabileceği öngörülmektedir [Baldé vd., 2017]. Bu artışın en önemli nedeni, tüketicilerin elektronik cihazları daha sık yenilemeleri ve eski cihazları atarak yeni modellere geçmeleridir. Bu durum, hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli sonuçlar doğurmaktadır. Atık baskılı devre kartlarının geri dönüşümü ve bakır, titanyum gibi değerli metallerin kazanılması, kaynakların korunması ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, bakır, titanyum gibi değerli metallerin yeniden kullanılması, yeni kaynaklar bulma ve çıkarma ihtiyacını azaltarak, çevrenin korunmasına da katkı sağlamaktadır. Bu çalışma, atık baskılı devre kartlarından değerli metal geri kazanımı için farklı yöntemleri araştırmayı ve değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, değerli metallerin geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılmasına yönelik sürdürülebilir uygulamaların kullanımı ile kaynakların korunmasına ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Bu çalışma, ABDK'lerin yönetimi ve bakır geri kazanımı konusunda önemli bir farkındalık yaratmayı ve ilgili tarafları bu konuda bilgilendirmeyi amaçlamaktadır.

1.4. Kapsam ve Sınırlamalar

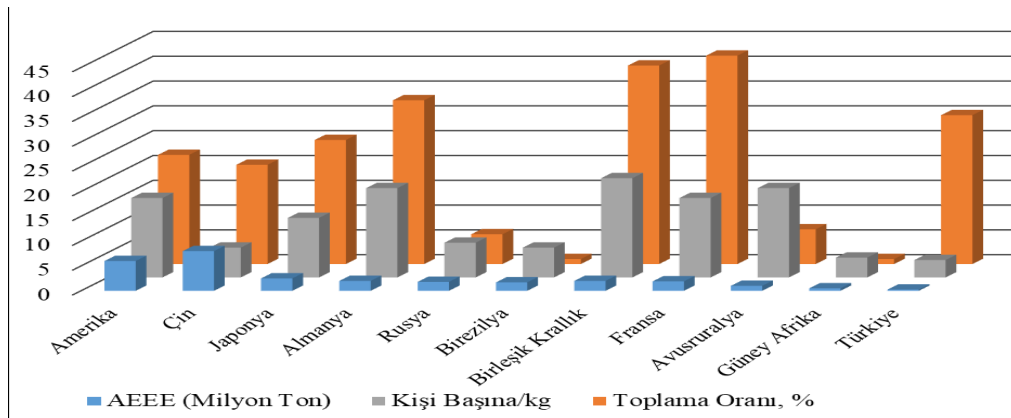
Bu tezde, değerli metallerin geri kazanımına yönelik ABDK'lerden değerli metal geri kazanımı süreçleri incelenmiştir. Bu alışmada, ABDK'lerin geri dönüşümünde kullanılan en sık yöntemler olan mekanik ve hidrometalurjik işlemler ele alınmıştır. Öncelikle, bu yöntemlerin farklı süreçlerini ve avantajlarını açıklayan literatür taraması yapılmıştır. Ardından, her iki süreç aracılığıyla ABDK'nin metal içeriği ortaya konulmuştur. Bu çalışmanın bir sınırı, yalnızca 90'lı yıllardan kalma bir masa üstü bilgisayarına ait anakartın içeriği ortaya konulup geri kazanımı için hidrometalurjik yöntem uygulamıştır. Başka anakartlar farklı oranlarda değerli metal içeriğine sahip olabilmektedir. Ayrıca, genel olarak sürdürülebilir yöntemlerin kullanılmasının tüm atık bileşenleri geri kazanılmasına katkıda bulunacağı belirtilmiştir. Son olarak, bu tezde sunulan sonuçlar, yalnızca araştırmalar ve literatür taramasına dayanmaktadır. Bununla birlikte, bu çalışmanın kapsamı, daha ayrıntılı çalışmalar için bir temel oluşturabilir ve Türkiye'de e-atık yönetimine katkıda bulunup, değerli kaynakların ülkemizde kalmasına destekleyebilir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Elektronik Atıklara Genel Bakış

2.1.1. Elektronik Atık ve Karakterizasyonu

Elektronik atık, elektronik cihazların kullanım ömrü dolduğunda veya işlev göremez hale geldiğinde elden çıkartılan elektronik eşyalardır. Bu atıklar, evlerde, iş yerlerinde ve endüstriyel tesislerde yaygın olarak oluşmaktadır. E-atık miktarında son yıllarda önemli bir artış görülmektedir ve dünya çapında yaklaşık 44,7 milyon ton olarak tahmin edilmektedir [Santoso vd., 2019]. Bu artışın sebepleri arasında teknolojik gelişmeler, tüketici talebinin artması ve ürün ömrünün kısalması sayılabilir [Ongondo, 2011]. Dolayısıyla e-atıkların oluşum miktarı ülkelere göre farklılık göstermektedir. Bazı ülkeleri oluşturduğu e-atık miktarı Şekil 2.1’de gösterilmektedir [Web 1, 2022]. E-atıkların çoğu, kullanım ömrünü tamamlamamış, ancak teknolojinin gerisinde kalmış ürünler oluşturmaktadır. Bu durumun temel nedenlerinden biri de üreticilerin teknolojiyi aşamalı olarak tüketicilere sunma stratejileridir. Yanlış tüketim alışkanlıkları da işlevsel durumda olan ancak kullanılmayan cihazların atık durumuna gelmesinde etkili bir faktördür. Bu bağlamda, insanların tüketim alışkanlıklarına düzeltmeyi hedefleyen çalışmalar, sorunu kaynağında çözmeyi amaçlayan çabalar olarak görülmelidir [Web 2, 2016].



Şekil 2.1: Dünyadaki bazı ülkelerin 2016 yılına ait AEEE üretim oranları.

Elektronik ürünlerde, teknolojinin gelişmesiyle beraber ürünlerde kullanılan elementlerde artmıştır. Elektronik ürünlerde kullanılan elementlerin tarihsel değişimi, teknoloji ve materyal biliminin evrimini çarpıcı biçimde ortaya koymaktadır. Şekil 2.2,

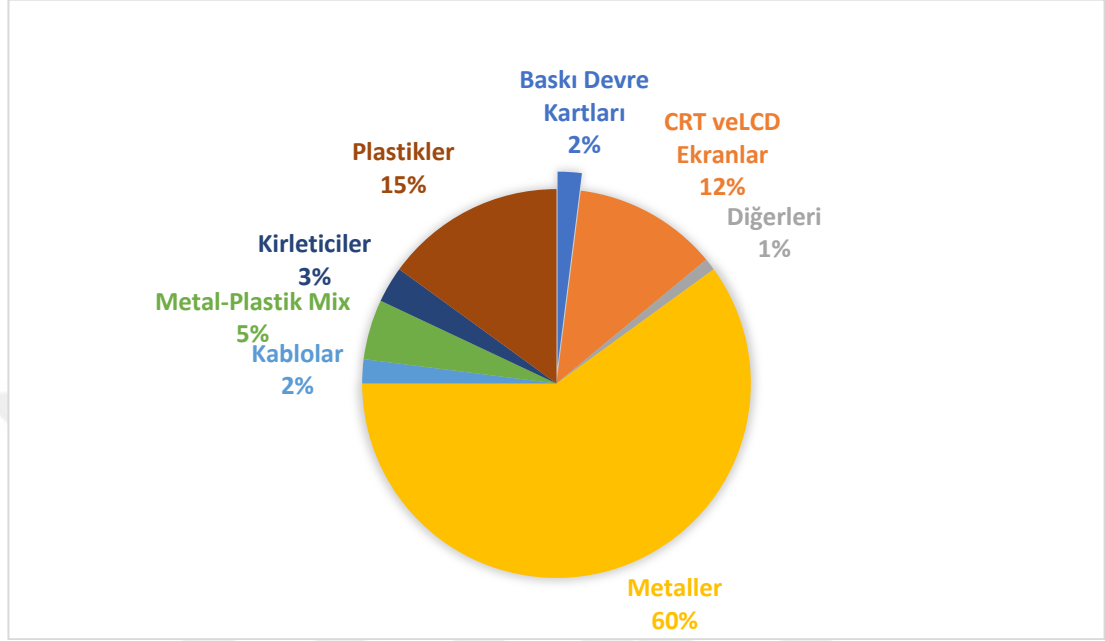
1 H																	2 He				
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr					

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Süper İletkenler	Elektrik Üretimi ve Depo	Rüzgar Türbini ve Elektrikli Araçlar	Bağlantı
Enerji Tasarrufu	Aydınlatma	Yenilenebilir Enerji Üretim	Güneş Enerjisi Üretimi
Enerji Depolama	Nükleer Elektrik Üretimi	Katalizör	

Piyasada bulunan çok farklı tipte ve miktarda elektrik-elektronik eşya olduğu için bunların atıklarının, atık akışı içindeki miktarlarını ve içlerinde barındırdıkları bileşenlerin anlamak son derece karmaşıktır. Tipik olarak, bu e-atıklar içeriğindeki maddeler demir, demir dışı metaller (alüminyum, bakır, altın, gümüş, paladyum vb.), cam, plastikler ve diğer materyaller olarak beş ayrı kümede değerlendirilmektedir. Elektrik-Elektronik eşyada farklı amaçlar için kullanılan cıva, kurşun, arsenik, kadmiyum, krom (+6), selenyum ve bromlu alev geciktirici (BAG) maddeler gibi çeşitli amaçlar için kullanılan maddeler, izin verilen sınırları aştıklarında insan sağlığını ve çevreyi tehdit edebilir, bu nedenle bu eşya atıkları tehlikeli atık statüsü kazanabilirler.

Elektrik-elektronik eşya bileşenleri içerisindeki büyük kısmının metallerin oluşturduğu ve kirleticiler gibi istenmeyen madde bileşenlerinin daha az olduğu Şekil 2.4'den görülmektedir [Yapıcı, 2016].



Şekil 2.4: EEE'lerin içerdiği bileşenlerin yüzde oranları.

2.2. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi

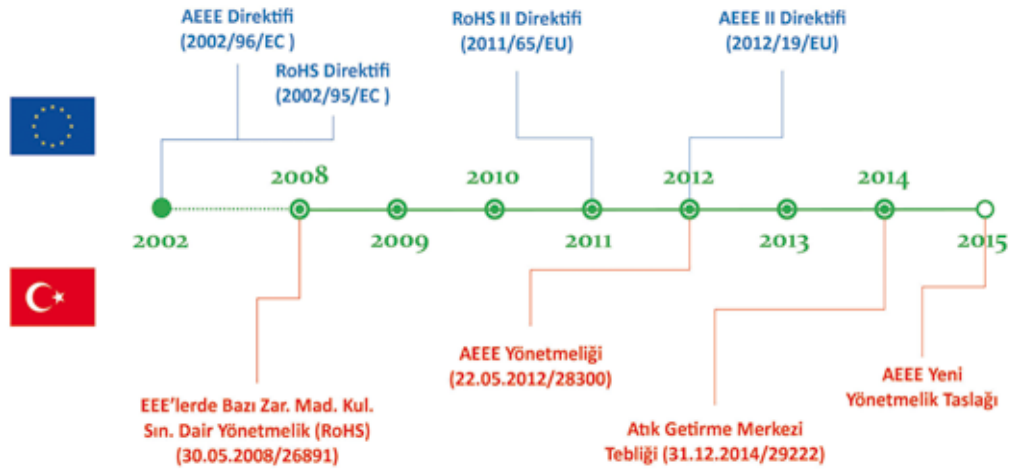
2.2.1. Dünya'da ve Avrupa Birliğinde AEEE Yönetimi

Atık Elektrik ve Elektronik Eşyaların (AEEE) yönetimi, küresel ölçekte olduğu gibi ülkemizde de en karmaşık atık yönetimi konularından biridir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, elektrik-elektronik eşyaların tipi ve miktarı hızla artmakta ve bahsedilen eşyaların kullanım yerleri artmaktadır. Hızla evrilen teknoloji nedeniyle birçok elektrik-elektronik eşya henüz ömürlerini doldurmadan atık hale getirilmektedir. Bu atıklar, insan ve çevre sağlığına oldukça zararlı olmalarına karşın, dünya genelinde kontrolsüz ve düzensiz bir şekilde toplanmakta ve bu durum, doğal kaynaklarımızın her geçen gün bozulma veya yok olma tehlikesiyle karşı karşıya kaldığı anlamına gelmektedir. Birleşmiş Milletler Üniversitesi (UNU) tarafından 2014 yılında yapılan bir araştırmaya göre, dünya genelinde 2014 yılında kayıtlara geçen 41,8 milyon E-atık ortaya çıkmıştır [Web 3, 2015]. Birleşmiş Milletlerin 2023 yılında yayınladığı rapora göre, 2023 yılı içinde dünya çapında kişi başına 7,6 kg e-atık

üretilmiştir. Bu, e-atık miktarının hızla artmaya devam ettiğini ve bu atıkların büyük bir kısmının geri dönüştürülmediğini göstermektedir. Dünyadaki e-atık üretimi, elektronik cihazların yaygınlaşmasıyla birlikte her yıl büyüyen bir sorun haline gelmiştir ve toplamda 2023'te dünya genelinde yaklaşık 62 milyon ton e-atık üretilmiştir. Değerli malzemelerle birlikte zararlı maddeler içeren bu atığın yalnızca %17,4'ünün dünya genelinde düzgün bir şekilde toplanıp işlendiği ve geri dönüştürüldüğü belirtilmiştir. Geriye kalan 50,6 milyon ton atık ise ya çöplüklere atılacak, yakılacak, yasadışı yollarla ticareti yapılacak, standartların altında işlenecek ya da evlerde birikecektir. E-atık geri dönüşümünde öncü olan Avrupa'da bile, e-atıkların yalnızca %54'ünün toplandığı ve geri dönüştürüldüğü rapor edilmektedir. Ayrıca, kamuoyunun bu konuda yeterince bilinçli olmaması, ülkelerin elektronik ekipman için döngüsel ekonomiler geliştirmesini engellemektedir [Web 4, 2024]. Ancak, bu durumu daha da karmaşıklaştıran birkaç unsur vardır. Özellikle, e-atıkların evlerde veya iş yerlerinde terkedilmesi, tavan aralarında depolanması veya ikinci el ürün adı altında AB dışındaki ülkelere ihraç edilmesi gibi durumlar, resmi olarak toplanan atıklar ile oluşan atıklar arasında önemli bir farka neden olmaktadır. Ayrıca, yasa dışı e-atık ticareti de büyük bir sorun teşkil etmektedir. Tehlikeli atık sınıfına giren e-atıkların, OECD dışındaki ülkelere gönderilmesi yasak olmasına rağmen, bu tür ticaretin Batı Afrika ülkeleri ve Pakistan gibi yerlere yapıldığı bilinmektedir. Tehlikeli Atıkların Sınır ötesi Taşınması ve Bertaraf Edilmesinin Kontrolüne İlişkin Basel Sözleşmesi Sekretaryasının 2011 tarihli bir çalışmasına göre, yılda 250.000 ton civarında AEEE, Batı Afrika ülkelerine yasa dışı yollarla ihracatı gerçekleşmiştir [Web 5, 2011]. Bu ülkelerde sağlıksız koşullarda yapılan geri kazanım çalışmaları, hem çevreyi hem de bölge halkının sağlığını tehdit etmektedir.

Bütün bu istatistiki bilgilere rağmen, dünya genelinde ve özellikle Avrupa'da AEEE yönetimi, özellikle toplama ve geri dönüşüm aşamalarında büyük zorluklarla karşılaşmaktadır. Etkili bir AEEE yönetimi için, toplama ve taşıma sistemlerinin iyileştirilmesi/geliştirilmesi, e-atıkların geri kazanımı, geri dönüşümü ve/veya bu ekipmanların insan ve çevre sağlığına zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Avrupa Birliği, tüm üye ülkeleri e-atıkları toplama ve geri dönüşüm konusunda teşvik etmek ve bu süreçlerde yer alan paydaşların görev ve sorumluluklarını belirlemek amacıyla bir AEEE yönetimi mevzuatı oluşturmuştur. Ancak, artan atık kirliliği sorununu tam anlamıyla çözmekte başarılı olamamıştır.

Avrupa Birliği, e-atıkların sürdürülebilir yönetimini güvence altına almak, belirlenen geri dönüşüm hedeflerini gerçekleştirmek ve ekonomiye katkıda bulunmak amacıyla 2002/96/EC numaralı AEEE Direktifi [**Directive 1, 2002a**] ile 2002/95/EC numaralı RoHS Direktifini [**Direktive 2, 2002b**] yayınlamıştır. Özellikle, AB AEEE Direktifi, AEEE yönetiminde ulaşılması gereken geri dönüşüm hedeflerini ve paydaşların sorumluluklarını belirlerken, RoHS Direktifi, EEE'lerin içeriğindeki tehlikeli maddelerin kısıtlanma düzeyini ve bu maddelerin yerine kullanılabilecek alternatifleri tanımlar. RoHS Direktifi, gelişen teknoloji ile birlikte ve EEE'lerin içerik değişikliklerine paralel olarak 2011 yılında revize edilmiş ve 2011/65/EU numaralı RoHS Direktifi olarak kabul edilmiştir [**Directive 3, 2011**]. AB AEEE Direktifi de aynı şekilde, 2008 yılından itibaren e-atık miktarlarına karşı önlemler alabilmek adına revize edilmiş, 2012/19/EC numaralı AEEE Direktifi olarak 2012 yılında yürürlüğe girmiş [**Directive 4, 2012**] ve 2014 yılında birlik genelinde etkin hale gelmiştir. AB ve Türkiye'nin AEEE ile ilgili Mevzuat Tarihçesi Şekil 2.5'de gösterilmiştir [**Web 2, 2016**].



Şekil 2.5: AB ve Türkiye'de AEEE ile ilgili mevzuat tarihçesi.

2.2.2. Ülkemizde AEEE Yönetimi

Türkiye'nin Avrupa Birliği üyeliği hedefi doğrultusunda, ülkenin Avrupa Birliği standartlarına uygun hale getirilmesi ve bu standartların uygulanması gerekmektedir. Bu bağlamda, Türkiye'de Atık Elektrik ve Elektronik Ekipmanların (AEEE) yönetimiyle ilgili ilk adımlar, 2004 yılında Hollanda Hükümeti ile yürütülen Matra Projesi kapsamında atılmıştır. 2007 yılında düzenlenen TAİEX Teknik Destek

Programı çerçevesinde, Çevre ve Orman Bakanlığı (günümüzdeki adıyla T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı) AEEE'lerin yönetimi konusunda Avrupa Birliği'nin AEEE ve RoHS Direktiflerinin hazırlık süreçlerinde görev alan sektör temsilcileri ve yetkili kurumlar, örneğin UK Department for Business Enterprise and Regulatory Reform (BERR) gibi kurumlarla bir araya gelerek bilgi alışverişinde bulunmuştur [Çiftlik vd, 2009]. Bu görüşmelerin sonuçlarına dayanarak, Çevre ve Orman Bakanlığı (sonraki adıyla) RoHS Direktifi ile uyumlu bir taslak yönetmelik oluşturdu. Bu yönetmelik, 2008 yılında "Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Sınırlandırılmasına Dair Yönetmelik" başlığıyla 26891 sayılı Resmi Gazetede yayımlanarak 2009 yılında yürürlüğe girdi. İnsan ve çevre sağlığının korunmasını öncelikli hedefleyen bu yönetmelik, üretilen veya ithal edilen EEE'lerin içeriğindeki zararlı ve zehirli maddelerin sınırlandırılması, sınırlandırma dışındaki maddelerin ve uygulamaların belirlenmesi, yerel üretim ve ithalatın kontrol altında tutulması gibi teknik süreçlere ilişkin kuralları belirlemeyi amaçlamıştır [Web 2, 2016].

Avrupa Birliği'nin 2002/95/EC sayılı RoHS ve 2002/96/EC sayılı AEEE Direktifleri ile uyumlu hale getirilmesi amacıyla, Türkiye'de 2012 yılında "Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği" 28300 sayılı Resmi Gazetede yayımlanmış ve uygulanmaya başlamıştır. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği'nin yürürlüğe girmesiyle birlikte, 2008 tarihli Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Sınırlandırılmasına Dair Yönetmelik ortadan kalkmıştır. Şu anki durumda, Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2012 tarihli "Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliğini, Avrupa Birliği mevzuatına uyum sağlamak adına 2012/19/EC sayılı AEEE Direktifine uygun hale getirmek için çalışmalarını sürdürmektedir. Bu kapsamda yapılan ikinci değişiklik taslağı ise Mayıs 2016'da kamuoyuna sunulmuştur.

Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliğine göre "Ek-1A'da verilen kategorilere dahil olan ve alternatif akımla 1000 Volt'u, doğru akımla da 1500 Volt'u geçmeyecek şekildeki kullanımlar maksadıyla tasarlanmış olan, uygun bir biçimde çalışması için elektrik akımına veya elektromanyetik alana bağımlı olan eşyalar ve bu akım ve alanların üretimi, transferi ve ölçümüne yarayan eşyalar" şeklinde tarif edilmiş ve bu kategorilerde yer alan ürünlerin kullanım ömrü dolduğunda bütün bileşenleriyle AEEE

olarak kabul edilmiştir. Yönetmelikte Ek-1B’de ayrıntılı olarak açıklanan elektrikli elektronik eşya kategorileri Tablo 2.1’de verilmiştir [ResGaz 1, 2012].

Tablo 2.1: Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği EK-1/A-B.

<u>(EK-1/A) Kategoriler</u>	<u>EK-1/B Başlıca Kategori Detayları</u>
1. Büyük ev eşyaları	a) Buzdolapları b) Çamaşır makineleri c) Bulaşık makineleri ç) Elektrikli ocaklar d) Mikrodalga fırınlar e) İklimlendirme cihazları f) Elektrikli ve elektronik eşya tanımı kapsamındaki diğer büyük ev eşyaları
2. Küçük ev aletleri	a) Elektrikli süpürgeler b) Örgü, dokuma, dikiş makineleri ve diğer kumaş işleyici makineler c) Ütü makineleri, ütüleme ve diğer giysi bakım aletleri ç) Tost makineleri d) Kızartma makineleri e) Saç kesimi, saç kurutucu, diş fırçalama, tıraş, masaj ve diğer vücut bakım aletleri f) Elektrikli ve elektronik eşya tanımı kapsamındaki diğer küçük ev aletleri
3. Bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları	a) Merkezi veri işlemesi: b) Kişisel bilgisayar ve ekipmanları c) Yazıcılar ç) Telefonlar d) Telesekreterler ve telekomünikasyon vasıtasıyla ses, görüntü ve başka bilgilerin iletilmesi için kullanılan diğer ürün ve ekipmanlar e) Elektrikli ve elektronik eşya tanımı kapsamındaki diğer bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları

Tablo 2.1: (Devamı).

4. Tüketici ekipmanları	a) Televizyon alıcıları b) Video kameraları c) Ses yükselteçleri ç) Müzik enstrümanları d) Telekomünikasyon dışında görüntü ve sesin dağıtımını sağlayan sinyaller ve diğer teknolojiler de dâhil olmak üzere, görüntü ve ses kaydı veya bunların reproduksiyonu amacıyla kullanılan diğer ürün ve ekipmanlar e) Elektrikli ve elektronik eşya tanımı kapsamındaki diğer tüketici ekipmanları
5. Aydınlatma ekipmanları	a) Floresan lambalı aydınlatıcılar b) Basınçlı sodyum lambalar c) Akkor flamanlı ampuller hariç ışık verme veya ışık kontrolü için kullanılan diğer ekipmanlar d) Elektrikli ve elektronik eşya tanımı kapsamındaki diğer aydınlatma ekipmanları
6. Elektrikli ve elektronik aletler (büyük ve sabit sanayi aletleri hariç olmak üzere)	a) Matkaplar b) Dikiş makineleri c) Ahşap, metal veya diğer malzemelerin işlenmesinde kullanılan torna, değirmen, kumlama, zımpara, kesme, parçalama, delme, delik açma, dövme, katlama, eğme ve diğer işleme aletleri ç) Elektrikli ve elektronik eşya tanımı kapsamındaki diğer elektrikli ve elektronik aletler
7. Oyuncaklar, eğlence ve spor ekipmanları	a) El tipi video oyun konsolları b) Bisiklet sürme, koşma, kürek çekme vb. sporlar için kullanılan bilgisayarlar c) Jetonlu makineler ç) Elektrikli ve elektronik eşya tanımı kapsamındaki diğer oyuncaklar, eğlence ve spor aletleri
8. Tıbbi cihazlar (implantasyon ürünleri ve hastalık bulaşıcı temaslarda bulunan ürünler hariç)	a) Kardiyoloji ekipmanı b) Nükleer tıp ekipmanı c) Tüp teşhisleri için gerekli laboratuvar ekipmanı ç) Elektrikli ve elektronik eşya tanımı kapsamındaki diğer tıbbi cihazlar
9. İzleme ve kontrol aletleri	a) Duman dedektörü b) Isı ayarlayıcıları c) Evsel veya laboratuvar ortamında kullanılan ölçme, tartma ve ayarlama cihaz ve aletleri ç) Elektrikli ve elektronik eşya tanımı kapsamındaki izleme ve kontrol aletleri

Tablo 2.1: (Devamı).

10. Otomatlar	a) Sıcak veya soğuk şişe veya kutu otomatları b) Para otomatları c) Otomatik şekilde her çeşit ürün teslim eden bütün aletler ç) Elektrikli ve elektronik eşya tanımı kapsamındaki diğer otomatlar
---------------	---

2.3. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Süreç

E-atıklarda süreç, atık elektrikli ve elektronik ürünleri toplanma, taşıma, ayrıştırılma, geri kazanılma ve bertaraf edilme durumlarını kapsayan bir süreçtir. Bu süreç, kamu kurumları, özel sektör ve tüketicilerin birlikte çalışmasıyla yürütülür.

- **Toplama**

E-atıkların toplanması, sürecin birinci ve en önemli adımıdır. E-atıkların, evsel atıklarla birlikte atılması, insan ve çevre sağlığı için büyük bir risk oluşturur. Bu sebeple, e-atıkların, e-atık toplama noktalarına veya geri dönüşüm merkezlerine götürülmesi çok önemlidir.

E-atık toplama noktaları, belediyeler şehirlerin belli noktalarına, büyük işletmeler veya fabrikalar tarafından kendi içlerinde kurulabilir. Bu noktalar, genellikle, belediye binaları, organize sanayi bölgeleri, üniversiteler, okullar ve alışveriş merkezleri, gibi yerlerde bulunur.

E-atık toplama noktalarında, tüketiciler, E-atıklarını ücretsiz olarak bırakabilirler. E-atıklar, Şekil 2.6’da gösterildiği gibi genellikle, konteynerler veya kutular kullanılarak toplanır [Web 6, 2024].



Şekil 2.6: E-atık toplama kutuları ve konteynerleri.

- **Taşıma**

E-atık toplama noktalarına veya geri dönüşüm merkezlerine getirilen e-atıklar, bu noktalardan geri dönüşüm tesislerine taşınır. Taşıma, genellikle, lisanslı kamyonlarla konteynerler içinde MoTaT (Mobil Atık Takip Sistemi) girdisi yapılarak Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca lisanslı firmalara/geri dönüşüm tesislerine taşınarak yapılır.

Taşıma sırasında, e-atıkların zarar görmemesi, dökülmemesi için, gerekli önlemler alınmalıdır. e-atıklar, genellikle sabitleme cihazları kullanılarak, kamyonlara veya konteynerlere sabitlenir.

- **Ayrıştırma**

Geri dönüşüm tesislerine getirilen e-atıklar, ayrıştırma işlemine tabi tutulur. Bu işlemde, e-atıklar, malzeme türlerine göre ayrılır.

Ayrıştırma işlemi, genellikle, manuel veya otomatik olarak yapılır. Manuel ayırma işleminde, çalışanlar, e-atıkları, gözle veya elle ayırırlar. Otomatik ayırma işleminde ise, e-atıklar, çeşitli makineler kullanılarak ayrılır.

Ayrıştırma işlemi, e-atıkların geri kazanımını kolaylaştırır. Örneğin, metaller, plastikler ve cam gibi farklı malzemeler, farklı geri kazanım yöntemleri kullanılarak geri kazanılır.

- **Geri kazanım**

Ayrıştırma işleminin ardından, e-atıklar, geri kazanım işlemine tabi tutulur. Bu işlemde, e-atıklardan, yeniden kullanılabilir veya geri dönüştürülebilir malzemeler elde edilir.

Geri kazanım işlemi, genellikle, aşağıdaki aşamaları içerir:

- **Ön işlem:** E-atıklar, boyutlarına, şekillerine ve özelliklerine göre parçalanır.
- **Temizleme:** E-atıklardan, kir, yağ ve diğer yabancı maddeler temizlenir.
- **Ayırma:** E-atıklar, malzeme türlerine göre ayrılır.
- **Geri dönüştürme:** E-atıklardan, yeniden kullanılabilir veya geri dönüştürülebilir malzemeler elde edilir.

Geri kazanım işlemi, e-atıkların çevreye ve ekonomiye önemli faydalar sağlar. Örneğin, geri kazanılan metaller, yeni metal üretimi için kullanılabilir. Buda, yeni metal üretimi için gereken enerji ve kaynakların azaltılmasına yardımcı olur.

- **Bertaraf**

Geri kazanımı mümkün olmayan e-atıklar, bertaraf edilir. Bertaraf işlemi, e-atıkların çevreye zarar vermeyecek şekilde yok edilmesini kapsar.

Bertaraf işlemi, genellikle, aşağıdaki yöntemleri içerir:

- **Enkazlama:** E-atıklar, özel olarak hazırlanmış alanlarda, toprağa gömülür.
- **Yakma:** E-atıklar, yüksek sıcaklıkta yakılarak, yok edilir.
- **Dezenfeksiyon:** E-atıklardan, zararlı maddeler uzaklaştırılır.

E-atık yönetiminin aşamaları, yukarıda sıralandığı gibidir. Bu aşamaların her biri, e-atıkların çevreye zarar vermeden ve ekonomik olarak fayda sağlayacak şekilde yönetilmesi için önemlidir.

2.4. Baskılı Devre Kartları (BDK)

Elektronik bileşenlerin bir araya getirilerek bir elektronik devre oluşturulmasını sağlayan bir platformdur. BDK'ler, ince bir yalıtkan tabaka üzerine yerleştirilen ve

önceden belirlenmiş bir devre şemasına göre bağlantıları yapılan bakır izlerden oluşur. Bu bakır izler, elektronik bileşenlerin birbirleriyle iletişim kurmasını sağlar. Bu bileşenler, özellikle elektronik devrelerin üretiminde kullanılan bakır, altın, gümüş ve nikel gibi değerli metalleri içermektedir **[Kaya, 2016]**. Bununla birlikte, BDK'ler, elektronik cihazların kullanım ömürleri sona erdikten sonra atıldığında, çevreye zararlı olabilen birçok kimyasal maddeyi de içerir. Bu kimyasallar, kurşun, cıva, kadmiyum ve arsenik gibi tehlikeli maddelerdir **[Goosey ve Kellner, 2003]**. Ayrıca, BDK'ler, yanıcı plastik, cam elyaf ve diğer organik bileşiklerden oluşan yanıcı malzemeleri de içerebilir **[Li ve Zeng, 2012]**.

BDK'ler, elektronik cihazların temel yapı taşlarından biridir ve birçok farklı endüstride kullanılırlar. Bilgisayarlar, cep telefonları, televizyonlar, araç elektroniği, tıbbi cihazlar, endüstriyel kontrol sistemleri gibi birçok elektronik üründe BDK'ler bulunur. BDK'ler, elektronik üretim sürecinin önemli bir parçasıdır ve tasarım, prototipleme ve seri üretim aşamalarında kullanılırlar. BDK tasarımı ve üretimi karmaşık bir süreç olabilir ve yüksek hassasiyet, doğruluk ve kalite gerektirebilir. Şekil 2.7'de Örnek BDK'ler gösterilmiştir.

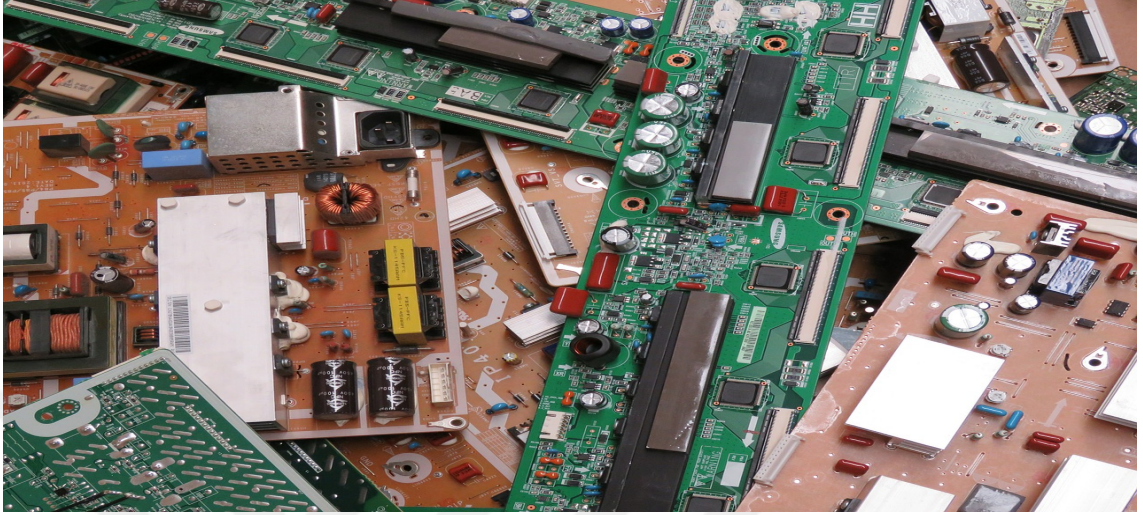
Baskılı devre kartlarının temel bileşenleri şunlardır:

- Yalıtkan tabaka: BDK'nin alt kısmını oluşturan ve elektronik bileşenleri birbirinden ayıran yalıtkan bir tabakadır.
- Bakır izler: Elektronik bileşenlerin birbirleriyle iletişim kurmasını sağlayan bakır tabakalardır.
- Lehimleme: Elektronik bileşenlerin BDK'ye sabitlenmesi için kullanılan bir işlemdir.

Baskılı devre kartları, aşağıdaki şekillerde sınıflandırılabilir:

- Tek katmanlı BDK'ler: Tek bir yalıtkan tabaka ve bakır izlerden oluşan BDK'lerdir.
- Çok katmanlı BDK'ler: Birden fazla yalıtkan tabaka ve bakır izlerden oluşan BDK'lerdir.
- Füzyon BDK'ler: İki veya daha fazla BDK'nin birleştirilmesi için kullanılan bir işlemle oluşturulan BDK'lerdir.

Baskılı devre kartları, elektronik cihazların çalışmasını sağlamak ve karmaşık devreleri organize etmek için önemli bir bileşendir. BDK'lerin tasarımı ve üretimi, elektronik üretiminin önemli bir parçasıdır [[Alwaidh vd., 2014]; [Kaya, 2016]].



Şekil 2.7: Baskılı devre kartları.

2.4.1. Baskılı Devre Kartlarının Temel Bileşenleri

Anakart, bir bilgisayarın temel bileşenlerini iletişimlerini sağlayan bir devre kartıdır. İşte anakartın üzerinde bulunan temel bileşenlerin kısaca açıklamaları:

- Soket: İşlemciyi (CPU) bağlamak için kullanılan sokettir. İşlemcinin fiziksel olarak anakarta bağlandığı noktadır.
- Bellek Yuvaları: RAM (Bellek) modüllerini takmak için kullanılan yuvalardır. Bu yuvalar, bellek modüllerinin anakarta takılmasını ve veri transferini sağlar.
- PCIe Yuvaları: Genişletme kartlarının (grafik kartı, ses kartı, ağ kartı vb.) takılması için kullanılan yuvalardır. PCIe, yüksek hızlı veri transferini destekleyen bir bağlantı standardıdır.
- BIOS Yongası: Anakartın üzerinde yer alan yazılımı barındıran yongadır. BIOS (Temel Giriş/Çıkış Sistemi), bilgisayarın başlangıcında donanımın yapılandırılmasını ve işletim sistemi yüklenmeden önce önemli işlevleri gerçekleştirir.

- Güç Bağlantıları: Anakart, güç kaynağından gelen elektrik enerjisini kullanır. Bu nedenle, anakart üzerinde güç bağlantı noktaları bulunur. Bunlar genellikle 4 veya 8 pinlik CPU güç konektörü ve 24 pinlik ana güç konektörüdür.
- Depolama Bağlantıları: Sabit diskler (SATA), SSD'ler (SATA veya M.2) ve optik sürücülerin (DVD, Blu-ray vb.) bağlanması için kullanılan konektörlerdir.
- SATA Bağlantıları: Sabit disk ve optik sürücü gibi depolama cihazlarının bağlandığı konektörlerdir. Her bir bağlantı noktası bir SATA kablosu ile depolama cihazına bağlanır.
- USB Bağlantı Noktaları: Harici cihazların (klavye, fare, harici disk, yazıcı vb.) bağlandığı USB portlarıdır. Anakart üzerinde genellikle USB 2.0 ve USB 3.0 portları bulunur.
- Ethernet Bağlantı Noktası: Kablolu ağ bağlantısının gerçekleştirildiği RJ-45 konektördür. Ethernet bağlantı noktası, bilgisayarın internete veya ağa bağlanmasını sağlar.
- Ses Bağlantı Noktaları: Hoparlör veya kulaklık gibi ses çıkış cihazlarının bağlandığı 3,5 mm ses konektörleridir. Ayrıca mikrofon girişi için de ayrı bir bağlantı noktası mevcuttur.
- İşlemci (CPU): Bilgisayarın tüm hesaplama işlemlerini gerçekleştirir. Bu yüzden bilgisayarın beyni olarak adlandırılır. İşlemci, anakart üzerindeki sokete takılır.
- Bellek (RAM): Bilgisayarın geçici verileri depoladığı hafıza birimidir. RAM, anakart üzerindeki bellek yuvalarına takılarak kullanılır. RAM, işlemcinin hızına ve anakartın desteklediği bellek türüne uyumlu olmalıdır.
- Grafik Kartı (GPU): Görsel işlemleri gerçekleştiren donanımdır. Birçok anakart, entegre grafik işlem birimine (IGP) sahiptir, ancak oyun veya grafik yoğun uygulamalar için daha yüksek performans gerektiren ayrık bir grafik kartı da takılabilir. PCIe yuvalarından birine takılır.
- Depolama Birimleri: Katı hal sürücüler (SSD) ve Sabit disk sürücüler (HDD) gibi depolama birimleri, verilerin kalıcı olarak saklandığı yerlerdir. Bu birimler, SATA veya M.2 konektörleri üzerinden anakarta bağlanır.

- Güç Kaynağı (PSU): Bilgisayarın tüm bileşenlerine güç sağlayan birimdir. Güç kaynağı, elektrik prizine bağlanır ve anakart üzerindeki güç bağlantı noktalarına bağlanır.
- Soğutma Sistemi: İşlemci ve diğer parçaların fazla ısınmasını önlemek amacıyla kullanılan sistemdir. Genellikle soğutma blokları, fanlar ve ısı boruları gibi bileşenleri içerir. İşlemci ve grafik kartı gibi bileşenler üzerindeki ısı emici yüzeylere takılır.
- Ekran Bağlantısı: Monitör veya diğer görüntü cihazlarının anakarta bağlandığı konektördür. Genellikle HDMI, DisplayPort veya DVI gibi bağlantı noktaları kullanılır.
- Optik Sürücü: DVD, CD veya Blu-ray diskleri yazan veya okuyan birimdir. Optik sürücüler anakarta SATA bağlantı noktaları üzerinden bağlanır.
- Kondansatörler: Elektrik yükünü depolayan ve salan bileşenlerdir. Anakart üzerinde farklı büyüklüklerde ve tiplerde birçok kondansatör bulunur. Güç sağlama, gerilimi düzenleme ve sinyal stabilizasyonu gibi işlevleri vardır.
- Dirençler: Elektrik akımını sınırlayan veya belirli bir değerde tutan bileşenlerdir. Anakart üzerinde farklı direnç değerleri ve boyutlarda birçok direnç bulunur. Sinyal işleme ve voltaj düzenleme gibi işlevleri vardır.
- Transistörler: Elektrik sinyallerini kontrol etmek ve yükseltmek için kullanılan bileşenlerdir. Anakart üzerinde genellikle transistörler bulunur ve işlemcinin işlevselliğini destekler.
- Diyotlar: Elektrik akımının yönünü kontrol etmek veya düzenlemek için kullanılan bileşenlerdir. Diyotlar, anakart üzerinde güç dönüşümü, koruma ve sinyal işleme gibi çeşitli amaçlar için kullanılır.
- Entegre Devreler (IC'ler): Birçok elektronik bileşeni bir araya getiren ve belirli bir işlevi yerine getiren bileşenlerdir. Anakart üzerinde çeşitli entegre devreler bulunur, örneğin işlemci (CPU), grafik işlem birimi (GPU), ses işlemcisi, ağ denetleyicisi vb.
- Kristal Osilatörler: İşlemcinin zamanlama işlemleri için kullanılan hassas saat bileşenleridir. Anakart üzerinde bulunan kristal osilatörler, işlemcinin doğru saat frekansında çalışmasını sağlar.

- Bobinler (Endüktörler): Elektrik enerjisinin depolanmasında ve dönüşümünde kullanılan bileşenlerdir. Özellikle güç regülasyonu ve filtreleme için kullanılırlar.
- Entegre devre soğutucuları: Yüksek ısınma potansiyeline sahip entegre devrelerin (örneğin işlemci veya grafik işlem birimi) üzerine yerleştirilen soğutucu sistemlerdir. Isıyı dağıtarak ve soğutma sağlayarak bileşenlerin daha stabil bir şekilde çalışmasını sağlarlar.
- Jumperlar: Anakartın bazı özelliklerini yapılandırmak için kullanılan küçük bağlantı elemanlarıdır. Örneğin, BIOS ayarlarını sıfırlamak veya bellek frekansını ayarlamak gibi işlemlerde jumperlar kullanılır.
- BIOS Pil: Anakartın üzerinde bulunan küçük bir pildir. BIOS (Temel Giriş/Çıkış Sistemi) ayarlarının korunmasını sağlar. Bilgisayar kapatıldığında bile BIOS ayarlarının korunmasını sağlayarak saat, tarih ve diğer yapılandırmaların sıfırlanmamasını sağlar.
- Sensörler: Sıcaklık, voltaj ve fan hızı gibi parametreleri ölçen sensörler anakart üzerinde bulunabilir. Bu sensörler, sistem sıcaklığını izlemek ve gerektiğinde fan hızını veya voltajı ayarlamak için kullanılır.
- BIOS/UEFI Çip: Anakartın üzerinde bulunan bir yonga, bilgisayarın başlangıcında temel sistem ayarlarını sağlayan ve işletim sistemi yüklenmesini sağlayan firmware'ı barındırır. BIOS (Eski) veya UEFI (Yeni) olarak adlandırılan bu yazılım, anakartın önyükleme işlemlerini yönetir.
- CMOS Pil: BIOS/UEFI ayarlarının korunması için kullanılan bir pildir. Pil, anakart üzerindeki CMOS (Yarı İletken Metal Oksit) belleğini besler ve güç kesildiğinde bile ayarların korunmasını sağlar.
- Şase Bağlantısı: Anakart üzerinde bulunan metal bir bağlantı noktasıdır. Bilgisayar kasasının topraklama için anakarta bağlanmasını sağlar. Şase bağlantısı, statik elektrik birikimini önler ve bileşenlere zarar verme riskini azaltır.
- BIOS/UEFI Jumperı: BIOS/UEFI ayarlarını sıfırlamak veya yazılım güncellemesi gibi işlemler için kullanılan bir jumperdır. Jumperı belirli bir

Şekil 2.8 de gösterilmiştir [Web 7, 2016].

- Şekil 2.8 de gösterilmiştir [Web 7, 2016].



Bu bileşenler, anakartın daha spesifik işlevlerini destekleyen ve farklı bağlantılar veya kontroller sağlayan bileşenlerdir. Anakartın özellikleri ve kullanım amacına bağlı olarak daha fazla veya farklı bileşenler bulunabilir.

2.4.2. Baskılı Devre Kartlarının Kimyasal İçerikleri

Günümüzde hemen hemen çoğu EEE’de bulunan baskılı devre kartları çok kompleks bir yapıdan oluşmaktadır. Bünyesinde barındırdığı metaller, bileşikler, halojenler ve zehirli kimyasallardan dolayı e-atıkları zararlı atık sınıfında değerlendirilmesine sebep olan nedenlerden bir tanesidir. E-atıklarda bulunan metaller yaygın metaller, değerli metaller ve zehirli metaller oranları Tablo 2.2, Tablo 2.3 ve Tablo 2.4’te gösterilmiştir.

[Pekdemir, 2020].

Tablo 2.2: Başlıca E-atıklardaki baskılı devre elemanlarının zararlı metal içeriği.

Metal Ekipman Türü	Ba (ppm)	Be (ppm)	Cd (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Sb (ppm)
Buzdolabı	82	-	85	27	21000	2700
Çamaşır makinesi	65	-	-	39	2200	150
Klima	320	-	3	11	5800	310
LCD TV	3000	-	-	-	17000	1800
Masaüstü Bilgisayar	1900	1	9	270	23000	2200
Dizüstü Bilgisayar	5600	32	2	610	9800	1300
Cep Telefonu	19000	21	4	1100	13000	760
Mikrodalga Fırın	2000	-	-	860	17000	5900

Tablo 2.3: Başlıca E-atıklardaki baskılı devre elemanlarının yaygın metal içeriği.

Metal Ekipman Türü	Al (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Sn (ppm)	Zn (ppm)
Buzdolabı	16000	170000	21000	83000	17000
Çamaşır makinesi	1000	70000	95000	9100	2400
Klima	6900	75000	20000	19000	4900
LCD TV	63000	180000	49000	29000	20000
Masaüstü Bilgisayar	18000	200000	13000	18000	2700
Dizüstü Bilgisayar	18000	190000	37000	16000	16000
Cep Telefonu	15000	330000	18000	35000	5000
Mikrodalga Fırın	1400	320000	400000	15000	28000

Tablo 2.4: Başlıca E-atıklardaki baskılı devre elemanlarının değerli metal içeriği.

Metal Ekipman Türü	Ag (ppm)	Au (ppm)	Pd (ppm)
Buzdolabı	42	44	-
Çamaşır makinesi	51	17	-
Klima	58	15	-
LCD TV	600	200	-
Masaüstü Bilgisayar	570	240	150
Dizüstü Bilgisayar	1100	630	200
Cep Telefonu	3800	1500	300
Mikrodalga Fırın	200	-	-

2.5. Baskılı Devre Kartlarının Başlıca Kullanım Alanları

2.5.1. Elektronik Cihazların Temel İnşa Taşı

Baskılı devre kartları, elektronik bileşenlerin bir araya getirilerek bir elektronik devre oluşturulmasını sağlayan temel bir platformdur. Bilgisayarlar, cep telefonları, televizyonlar, araç elektroniği, tıbbi cihazlar, endüstriyel kontrol sistemleri gibi birçok elektronik ürün, BDK'leri kullanır. Bu kartlar, elektronik devrelerin doğru ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak için gerekli olan bağlantıları ve iletişimi sağlar.

2.5.2. İleri Teknoloji ve Minyatürizasyon

Günümüzdeki teknolojik ilerlemeler, elektronik cihazların daha küçük, daha hafif ve daha güçlü olmasını gerektirmektedir. BDK'ler, bu talepleri karşılamada önemli bir rol oynar. İleri baskı teknikleri ve daha küçük bileşenlerin kullanılması, BDK'lerin boyutlarını küçültürken, daha fazla işlevsellik ve yüksek yoğunluklu devrelerin yerleştirilmesine olanak tanır. Bu sayede, daha karmaşık cihazlar üretilebilir ve daha fazla özellik sağlanabilir.

2.5.3. İletişim ve Bağlantı Teknolojileri

Baskılı devre kartları, elektrik sinyallerinin iletilmesini ve elektronik cihazların birbirleriyle iletişim kurmasını sağlar. Veri aktarımı, sensörlerin çalışması, kontrol sistemlerinin yönetimi gibi birçok önemli işlev, BDK'ler aracılığıyla gerçekleştirilir. Gelişmiş BDK tasarımı ve bağlantı teknikleri, yüksek hızlı iletişimi destekleyebilir ve cihazlar arasındaki veri transferini hızlandırır.

2.5.4. Güvenilirlik ve Performans

Baskılı devre kartlarının kaliteli ve güvenilir bir şekilde üretilmesi, elektronik cihazların performansını ve dayanıklılığını etkiler. İyi bir BDK tasarımı ve üretimi, düşük sinyal kaybı, elektromanyetik parazitlerin azaltılması, termal yönetim ve mükemmel elektriksel performans sağlar. Bu da elektronik cihazların daha güvenilir, uzun ömürlü ve yüksek performanslı olmasını sağlar.

2.5.5. Prototipleme ve Üretim Kolaylığı

Baskılı devre kartları, elektronik prototiplerin hızlı ve maliyet etkin bir şekilde üretilmesini sağlar. BDK tasarımında kullanılan yazılımlar, prototip üretim sürecini hızlandırır ve tasarımların kolayca değiştirilmesine olanak tanır. Ayrıca, seri üretim aşamasında da baskılı devre kartlarının kullanılması, maliyetleri düşürür ve üretim sürecini optimize eder.

2.5.6. Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik

Baskılı devre kartları, sürdürülebilirlik açısından da önemli bir rol oynar. BDK'lerde kullanılan malzemeler arasında bakır, altın, gümüş ve diğer değerli metaller bulunur. Bu metallerin geri dönüşümü, değerli kaynakların yeniden kullanılmasını sağlar ve çevresel etkileri azaltır. E-atık yönetimi kapsamında BDK'lerin doğru bir şekilde geri dönüştürülmesi, değerli kaynakların israf edilmesini engeller ve çevre kirliliğinin önlenmesine katkı sağlar.

2.5.7. İnovasyon ve Endüstriyel Gelişme

Baskılı devre kartları, teknolojik inovasyon ve endüstriyel gelişme için kritik bir rol oynar. BDK tasarımı ve üretimi, yeni ürünlerin geliştirilmesini ve mevcut ürünlerin iyileştirilmesini mümkün kılar. Elektronik cihazların daha küçük, daha hızlı, daha güçlü ve daha işlevsel hale gelmesi, baskılı devre kartlarının gelişmiş tasarım ve üretim tekniklerine olan ihtiyacını artırır. Bu da BDK endüstrisinde sürekli bir yenilik ve gelişme döngüsüne yol açar.

2.5.8. İş birliği ve Küresel Entegrasyon

Baskılı devre kartları, küresel ölçekte işbirliğini ve entegrasyonu kolaylaştırır. Elektronik bileşenlerin küresel tedarik zinciri boyunca seyahat etmesi ve farklı ülkelerde tasarım, üretim ve montaj süreçlerinin gerçekleştirilmesi sıkça görülen bir durumdur. BDK'ler, bu süreçlerde farklı paydaşların işbirliği yapmasını ve küresel entegrasyonu sağlayan bir ortak dil olarak hizmet eder. Standartlaştırma çabaları ve küresel kalite yönetim sistemleri, bu entegrasyonu daha da güçlendirir ve işbirliğini artırır.

Sonuç olarak baskılı devre kartları, günümüzde elektronik cihazların temel bir bileşeni haline gelmiştir. İleri teknoloji, minyatürizasyon, iletişim ve bağlantı teknolojilerindeki gelişmeler, BDK'lerin önemini artırmış ve elektronik cihazların daha küçük, daha hızlı, daha güvenilir ve daha işlevsel olmasını sağlamıştır. BDK'ler, elektronik endüstrisindeki ilerlemelerin temel taşıdır ve gelecekte de teknolojik yeniliklerin vazgeçilmez bir parçası olmaya devam edecektir.

2.6. Atık Baskı Devre Kartlarının Çevresel Etkileri

Kaynakların korunması, mevcut doğal kaynakların sürdürülebilir şekilde kullanılarak tükenmelerinin önlenmesini amaçlar. BDK'lerin geri dönüşümü bu süreçte kritik bir rol oynar, çünkü geri dönüşüm işlemi sayesinde elektronik atıklardan değerli metaller geri kazanılır ve doğal kaynakların tükenmesi yavaşlatılır. Elektronik cihazların hızla gelişip çoğalmasıyla birlikte e-atık miktarı da artmakta, fakat bu atıkların büyük bir kısmı doğru şekilde işlenmeden çöp sahalarına gitmektedir.

Bu, kaynakların israf edilmesine ve çevreye zararlı atıkların birikmesine neden olmaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik, çevrenin ve doğal kaynakların sürdürülebilir bir şekilde korunması ve kullanılmasıdır. BDK'lerin geri dönüşümü, çevresel sürdürülebilirliği amaçlayan önemli bir uygulamadır. BDK'ler, çevreye zararlı kimyasallar içermesi nedeniyle, doğrudan çöp sahalarına atılması durumunda çevre kirliliğine neden olabilir. Bu nedenle, BDK'lerin geri dönüştürülmesi, çevreye zararlı atıkların azaltılmasına ve kaynakların sürdürülebilir kullanımına katkıda bulunur. Ayrıca, BDK'lerden geri kazanılan değerli metaller, yeni ürünlerin üretiminde kullanılarak kaynakların korunmasına ve doğal kaynakların tükenmesinin önlenmesine yardımcı olabilir [Duan vd., 2018].

Aynı zamanda atık BDK'lerin doğaya bırakılması veya yanlış yöntemlerle imha edilmesi, çevresel sorunlara neden olmaktadır. BDK'ler, insan sağlığına ve çevreye zararlı olabilecek çeşitli kimyasallar içermektedir. Bu kimyasalların bazıları, insan vücuduna girdikten sonra birikerek toksik etkiler göstermektedir. Örneğin, BDK'lerin içinde bulunan dioksinler, insan sağlığı üzerinde ciddi etkilere sahiptir. Ayrıca, çevreye sızan BDK'ler, toprağın ve suların kirlenmesine ve nihayetinde çevre ekosisteminin bozulmasına neden olmaktadır. Atık BDK'lerin çevresel etkileri, atık üretimi ve atık yönetimi süreçlerinde de ortaya çıkmaktadır. BDK'lerden oluşan atıkların depolanması ve bertarafı, çevreye ve insan sağlığına zarar verme riski taşımaktadır. Birçok ülkede, BDK atıklarının değerlendirilmesi ve imhası sıkı bir şekilde düzenlenmektedir [Web 8, 2014]. Ancak, gelişmekte olan ülkelerde bu düzenlemelerin uygulanması ve e-atıkların yönetimi genellikle yetersiz veya yok denecek kadar azdır. Bu nedenle, gelişmekte olan ülkelerde, atık BDK'lerin çevresel etkileri daha fazla yaşanmaktadır. E-atıklarda bulunan çevreye zararlı bazı organik ve inorganik maddeler Tablo 2.5'de gösterilmiştir [[McPherson, 2005]; [Mahesh, 2007]].

Tablo 2.5: E-atıkların içerdığı doğaya zararlı maddelerin bulundukları bileşenler.

Organik maddeler (Halojenli bileşikler)	Bulunduğu bileşen
Poli klorürlü bifenil Bromlu alev geciktiriciler* Kloroflorokarbon CFC Polivinil klorür (PVC)	Kondansatör ve transformatörler Baskılı devre kartları, entegre devreler (IC) Kabloların koruyucu plastikleri Soğutma ünitesi, yalıtım köpüğü Yalıtımlı kablolar
İnorganik maddeler (Metaller)	Bulunduğu bileşen
Antimony (Sb) Arsenik (As) Baryum (Ba) Berilyum (Be) Civa (Hg) * Çinko sülfür (ZnS) Galyum (Ga) Kadmiyum (Cd) * Kalay (Sn) Krom (VI) (Cr+6) * Kurşun (Pb) * Lityum (Li) Nadir toprak elementleri (ANTE) Nikel (Ni) Selenyum (Se)	Alev geciktiriciler Diyotlar (LED) ve mikrodalga entegre devreler Katot ışın tüpleri (CRT) Güç kaynakları, konnektörler Floresan lambalar, piller, ağ anahtarları CRT ekranlarında nadir toprak elementleri ile Diyotlar (LED) Toner, plastikler, Ni-Cd piller LCD, baskılı devre kartları (lehim) Disketler, çeşitli kaplamalar CRT, piller, baskılı devre kartları (lehim) Lityum piller CRT Ni-Cd piller, Ni-MH piller, elektron tabancaları Doğrultucular, eski nesil fotokopi cihazları

* Ağır Metaller

2.7. Atık Baskı Devre Kartlarının Ekonomik Etkileri

Atık BDK'lerin geri dönüştürülmesi, kaynakların korunması ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmanın yanı sıra ekonomik açıdan da önemli sonuçlar doğurmaktadır. Atık BDK'lerin içinde bulunan bakır, değerli bir madendir ve geri dönüştürülmesi, üretilmesinden daha ucuzdur. Bu nedenle, bakır geri kazanımı, atık BDK'lerin ekonomik açıdan değerlendirilmesinde önemli bir faktördür. Ayrıca, atık BDK'lerin geri dönüştürülmesi, yeni ürünlerin üretimi için gerekli kaynakların tasarruf edilmesine de katkıda bulunmaktadır. Bu da, kaynakların verimli kullanılması açısından önemlidir ve ekonomik sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır. Atık

BDK'lerin geri dönüştürülmesi ile üretilen geri dönüşüm malzemeleri ve ürünleri de ekonomik değere sahiptir. Örneğin, geri dönüştürülmüş bakır, birçok endüstride kullanılmaktadır ve atık BDK'lerden geri kazanılan bakırın tedariki, bu endüstriler için önemlidir. Bununla birlikte, atık BDK'lerin geleneksel yöntemlerle bertarafı ve imhası, atık yönetim maliyetlerini artırmaktadır [Li vd., 2006].

2.8. Bazı Elektronik Atık Uygulamaları

E-atıkların geri kazanımına ilişkin dikkat çekici uygulamalardan bir tanesi de 23 Temmuz-8 Ağustos 2021 tarihlerinde Japonya'da düzenlenen 2020 Tokyo Yaz Olimpiyat Oyunları'nın madalyalarının, geri dönüşümlü elektrikli aletlerden yapılmış olmasıdır.

Tokyo 2020 Olimpik ve Paralimpik Oyunları Organize Komitesi tarafından proje süresince Japonya genelinde kullanılmış cep telefonu, dijital kamera, taşınabilir oyun konsolu ve dizüstü bilgisayar gibi küçük elektronik aletler toplanarak yaklaşık 79 ton ağırlığında elektronik atık elde edilmiştir. Bu atıkların yaklaşık 6,21 milyon adedi kullanılmış cep telefonlarından oluşmaktadır.

Geri dönüşüm için toplanan bu cihazlar sınıflandırılarak parçalara ayrılmış ve eritilmiştir. Eritilme sırasında altın, gümüş ve bronz saf olarak diğer maddelerden ayrıştırılmıştır. Toplamda 32 kg altın, 3,5 kg gümüş ve 2,2 kg bronz elde edilmiştir. Proje sayesinde yaklaşık 5000 altın, gümüş ve bronz madalyanın geri dönüşümden elde edilen malzemelerden üretilip, geriye kalan atıkların ise farklı alanlarda yeniden değerlendirilmiştir. Geriye kalan atıklar ise farklı alanlarda yeniden değerlendirilecek. Benzer şekilde 2010 Vancouver Kış Olimpiyatları ve 2016 Rio Yaz Olimpiyatları'nda verilen madalyaların üretiminde de geri dönüşümden elde edilen malzemeler kullanılmıştır [Okutan, 2019].

2.9. E-Atıkların Geri Kazanımı için Yapılmış Bazı Çalışmalar

Biyolojik liç, maliyet açısından etkin bir yöntem olmasına rağmen zaman alıcıdır. Kimyasal liç ise nispeten hızlı ve verimlidir, ancak çevresel sorunlara yol açabilir. Daha güvenli kimyasalların kullanıldığı kimyasal liç ile biyolojik liçi birleştiren hibrit bir teknik önerilmiştir; bu, metal ekstraksiyonunda verimli ve doğaçılama bir yöntem sunabilir.

Önerilen hibrit yöntem, e-atıklarındaki metallerin ekstraksiyonu ile ilgili sorunları aşma potansiyeline sahiptir. Bu hibrit yaklaşımın aşağıdaki avantajları vardır:

- Hibrit teknik, cevherlerden veya e-atıkları gibi kaynaklardan metal çıkarmanın verimliliğini artırabilir.
- Bu teknik, tek başına biyolojik liçten daha az zaman alıcıdır.
- Hibrit teknikte kullanılabilen DTPA gibi ligandlar güçlü, yeniden kullanılabilir ve nispeten biyolojik olarak stabildir, dolayısıyla geri dönüştürülebilir.
- Belirli spesifik ligandları ve mikropları kullanarak metale özel ekstraksiyon elde etmek mümkündür.
- Bu strateji, eser miktarda bulunan metallerin cevherlerinden çıkarılmasını kolaylaştırabilecek yeni ve gelişmekte olan metalurji alanı sağlayabilir [Deepak Pant vd., 2012].

Pirometalurjik proseslerle karşılaştırıldığında, hidrometalurjik prosesler nispeten düşük sermaye maliyeti, azaltılmış çevresel etki (örneğin, tehlikeli gazlar/tozlar yok] ve küçük ölçekli uygulamalar için uygunlukları ile yüksek metal geri kazanımları sunar [Yazıcı vd., 2009].

WEEE'nin en önemli özelliği, WEEE için uygun bir liç prosesinin seçimi veya geliştirilmesi için pratik öneme sahip, doğal formda ve/veya alaşımlar halinde metallerin varlığıdır. Genel olarak, ilgilenilen baz ve değerli metallerin etkili bir şekilde ekstraksiyonu için bir oksidatif liç işlemi gereklidir.

Bir oksidan varlığında asit liçi, baskılı devre kartlarından bakırın ekstraksiyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır [Yazıcı vd., 2009]. Değerli metaller AEEE değerine önemli ölçüde katkıda bulunduğundan bunların çıkarılması bir geri dönüşüm işleminin ekonomisi için birincil öneme sahiptir. Bu nedenle hidrometalurjik prosesler, değerli metallerin çıkarılmasına odaklanmalıdır. Değerli metallerin geri kazanılması için test edilen en yaygın liç maddeleri arasında siyanür, halojenür, tiyoüre ve tiyosülfat bulunur [A. Tuncuk vd., 2012].

Mevcut çalışma, yüksek katı içeriklerde (%10-15) atık baskılı devre kartlarından metalleri geri kazanmak için entegre bir glisin bazlı işlem geliştirmiştir. Oda sıcaklığında >%99 bakır, >%85 çinko ve yaklaşık %50 kurşunu seçici olarak çıkarmak için yeni bir glisin-amonyak liç kullanılmıştır. Amonyak, çözeltideki bakır çözünürlüğünü artırarak (>40 g/L), liç süresini 72'den 24 saate kısaltarak ve ayrıca bir

pH değiştirici olarak hareket ederek önemli bir rol oynadı. İkinci liç adımında, altın ve gümüş için %70-90 ve paladyum için >%50 ekstraksiyonların elde edildiği siyanür açlığı glisin kullanıldı. Önceki adımlardan kalan metaller, tiyoüreli /olmadan ferrik sülfirik asit liçle uzaklaştırıldı. Tiyoüre varlığında, kalan baz ve değerli metallerin %70-95'i çıkarıldı. Genel olarak, büyük ekonomik değere sahip metallerin tümü bakır için >%99, altın için >%80, gümüş için >%90 ve paladyum için >%85 olarak çıkarıldı [Li vd., 2022].

Atık baskılı devre kartlarından (ABDK'ler) bakırın geri kazanılmasına yönelik mevcut hidrometalurjik işleme yöntemleri, çevresel tehlikeler oluşturan güçlü mineral asitleri kullanır. Glisin, çevre dostu bir çözücü alternatifi olarak öne sürülmüştür. Bu çalışmada, glisinin atık BDK'lerden bakır çözünmesindeki etkinliği incelenmiştir. Sıcaklık, oksidan türü ve çözücü konsantrasyonu gibi temel proses değişkenlerinin bakır liç hızı, kapsamı ve seçiciliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek için laboratuvar ölçekli liç testleri yapılmıştır.

Oksidan olarak oksijenin varlığında glisin konsantrasyonunun, 1 M ila 2 M aralığında bakır liçinin hızı veya kapsamı üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Sıcaklığın 25°C'den 60°C'ye arttırılması, 22°C'den sonra bakır çözünmesini arttırmıştır. 1 M glisin konsantrasyonu kullanıldığında h %29,6'dan %81,2'ye. Oksidan olarak oksijen yerine hava kullanıldığında, 60 °C'de 22 saat sonra 1 M glisin ile elde edilen bakır çözünmesi yüzde 43,9 puan azalarak %37,3'e düştü, Sistemdeki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun düşük olması nedeniyle. Oksidan olarak oksijen yerine hidrojen peroksitin kullanılması, elde edilen bakır liçinin genel boyutunu iyileştirmedir.

60 °C'de oksidan olarak 1 M glisin ve oksijen ile liç, araştırılan aralıklar dahilinde en uygun çalışma koşulları olarak önerilmiştir, çünkü bu koşullar nispeten düşük (%1,3) altın birlikte ekstraksiyonu ile en yüksek bakır çözünmesini (%81,2) sağlamıştır [CP., Broeksma ve Dorfling, 2023].

Elektrikli ve Elektronik ürünleri kullanmak her insanın alışkanlık haline gelmiştir. Bu durum E-Atık veriminin artmasına yol açmıştır. E-atıklar, içerdigi toksik maddeler nedeniyle çevreye olumsuz etkileri olan materyallerdir ve bu nedenle dikkatle işlenmeleri gerekmektedir. Elektrikli ve Elektronik Atıkların uygunsuz bertarafı, bazı metallerin havada birikmesine ve atmosferin bozulmasına yol açmıştır. Bu sebeple, hurdaya ayrılan Elektrikli ve Elektronik ürünlerin uygun şekilde imha edilmesi veya

geri dönüştürülmesi zorunludur ve araştırma açısından büyük önem taşımaktadır. E-Atık, altın, gümüş, bakır, demir gibi çeşitli metaller içerir. Bu metallerin hurdaya çıkan elektrikli ve elektronik ürünlerden çevreye duyarlı bir şekilde çıkarılması önemlidir. Elektrokimyasal, pirometalurjik, hidrometalurjik ve biyoliç yöntemleri, metalleri çıkarmak için en etkili yöntemlerdir. Elektronik ürünlerde bulunan ana metal genellikle bakırdır. Bu çalışmada, masaüstü bilgisayarların baskılı devre kartları, bu metali çıkarmak için kullanılmıştır. Bakırın çıkarılması için elektroliz işlemi, seçici anot ve katot kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Akım yoğunluğu, bakırın maksimum ekstraksiyon verimliliğini elde etmek için optimize edilmiştir. Bakırın varlığı, baskılı devre kartında diğer elemanlara kıyasla daha yüksek taraftadır [Sourav Choubey vd., 2021].

Atık baskılı devre kartları, atık elektrikli ve elektronik ekipmanlar (WEEE) arasında en karmaşık geri dönüşüm malzemeleri olarak tanımlanmaktadır. Asidik sistemle bulamaç elektrolizi, Atık baskılı devre kartlarından bakır doğrudan ayırıp geri kazanabilirken, safsızlık metallerinin birikmesi ve işlem sırasında hidrojen oluşumu nedeniyle verimlilik ve saflık genellikle düşmektedir. Amonyak bazlı bir sistemde ise bakır seçici olarak ekstrakte edilebilir ve bakır (II) amin kompleksleri, metalik bakır ile reaksiyona girerek bakır (I) amin kompleksleri oluşturur, bu da akım verimliliği ve saflığı artırır. Bu nedenle, cep telefonlarından elde edilen atık baskılı devre kartlarından yüksek saflıkta bakır geri kazanımı için verimli bir amonyak-amonyum karbonat bulamaç elektroliz sistemi önerilmektedir. Bakır akım verimliliği ve geri kazanım oranını etkileyen aktörler sistematik olarak incelenmiştir. Sonuçlar, artan NH_4OH , $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, Cu^{2+} , NaCl konsantrasyonunun, katı-sıvı oranının, akım yoğunluğunun ve reaksiyon süresinin bakır geri kazanım hızını ve akım verimliliğini etkili bir şekilde artırabileceğini göstermektedir. Bakırın mevcut verimliliği ve geri kazanım oranı, 20 g/L Cu^{2+} , 0,25 mol/L $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, 4 mol/L $\text{NH}_3\text{H}_2\text{O}$ optimum test koşulları altında sırasıyla %95,2 ve %90,4'tür. O, 30 g/L katı-sıvı oranı, 1 mol/L NaCl , 20 mA/cm², 3 saat Ayrıca katotta %99,97 saflıkta bakır geri kazanılabildi. Asidik sistemle karşılaştırıldığında bu çalışma, WPCB-MP'lerden yüksek saflıkta bakırın geri kazanılması için etkili bir yaklaşım sunarak WEEE kaynaklarının geri dönüşümü için ileriye dönük bir gelecek göstermektedir [Wang vd., 2021].

2.10. E-Atıklarda Bulunan Metallerin Geri Dönüşüm Yöntemleri

Toksik ve toksik olmayan bir metal, çeşitli yöntem ve tekniklerle ekstrakte edilebilir. Elementler kimyasal, mekanik ve biyolojik süreçlerle türetilebilir ve metalurji, metallerin çeşitli özellikler altındaki davranışlarının gözlemlenmesidir. Metal restorasyonuna iki ana yaklaşım vardır: metallerin proses katalizi ile süzüldüğü hidrometalurji ve termo şartlandırma işlemiyle ilgili olan pirometalurji yöntemi vardır. Daha sonra diğer iki yöntemden herhangi birinden daha ucuz ve daha çevre dostu olan Biyo-hidrometalurji yöntemidir. Basittir ve karmaşık makine gerektirmez [Asghari vd., 2013].

2.10.1. Fiziksel ve Mekanik İşlemler

Elektronik atıklara yönelik uygulanan mekanik işlemler, boyut küçültme, sınıflandırma ve ayırma adımlarını içerir. Bu aşamalarda, yoğunluk, tane boyutu, manyetik özellikler ve elektriksel özellikler gibi faktörler kullanılarak ayırma işlemi gerçekleştirilir [Gupta ve Yan, 2016]. Elektronik atıkların genel işlemleri, başlangıçta manuel olarak gerçekleştirilen sökme ve ayırma adımlarıyla başlar. Daha sonra çekiçli kırıcılar ve bıçaklı değirmenler gibi ekipmanlar kullanılarak, boyut küçültme işlemleri olan kırma ve öğütme uygulanır. Sonrasında, içerdiği metalleri ayırtmak amacıyla boyut, yoğunluk, manyetik ve elektriksel özelliklere dayanan sınıflandırma yöntemleri kullanılarak malzeme hazırlanır.

Geri dönüşümde kullanılan öğütme sürecinin temel amacı, madencilik, kimya ve benzeri endüstrilerdeki amaçla aynı olup elde edilmek istenen maddenin diğer bileşenlerden ayrıştırılmasıdır. Bu süreç, hammadde olarak kullanılacak maddeyi diğer maddelerden serbest bırakmayı hedefler. Ayrıca, yüzey alanının artırılması, sonraki aşamalarda uygulanacak kimyasal işlemlerde maddenin etkin bir şekilde kullanılmasını sağlar. Elektronik atıklar içerisinde bulunan farklı metallerin birbirinden ayrılması da bu yöntemle başarıyla gerçekleştirilir [Wills ve Finch, 2016]. ABDK'lerin öğütülmesi için yaygın olarak kullanılan ekipmanlar arasında genellikle döner çekiçli kırıcılar ve bıçaklı değirmenler bulunmaktadır. Bu ekipmanlar, özellikle plastik ve metal gibi esnek malzemelerin bir araya geldiği durumlar için etkili çözümler sunar. Döner çekiçli kırıcılar, malzeme üzerinde farklı yönlerde ve şiddetlere

uygulanan gerilme kuvvetleri sayesinde ince metal malzemelerin etkili bir şekilde öğütülmesini sağlar. Bıçaklı değirmenler ise özellikle elastik malzemelerin öğütülmesinde etkili bir performans sergiler. Bu iki öğütme cihazına ek olarak, elastik malzemelerin öğütülmesi için kullanılan kriyojenik öğütücüler de önemli bir yer tutar. Bu sistemde malzeme, sıvı azot yardımıyla soğutularak kırılgan hale getirilir, böylece değirmenin öğütme verimliliği artar. Kriyojenik öğütücüler, malzemenin soğutulmasını sağlayan özel bir donanımına sahiptir ve öğütme işlemine benzersiz bir yaklaşım sunar [Veit ve Bernardes, 2015].

2.10.2. Hidrometalurji

Hidrometalurjik işlem, metalik elementleri su ortamı reaktörlerine göre ayıran kimyasalları kullanan bir metal çıkarma işlemidir. 1887 yılında alümina ve altın cevherlerinin çıkarılması için siyanürleme ve Bayer yöntemi olarak bilinen iki özel yöntemin icadıyla önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. 20. yüzyılda, metalleri geri kazanmanın en etkili yöntemi olarak liç işlemi keşfedilmiştir [Habashi, 2005]. Bu iki aşamalı yöntemde, değerli metaller belirli bir liç maddesinde çözünerek ekstrakte edilir ve ardından metal, farklı bir çökeltme yöntemiyle geri kazanılır [Wordsworth vd., 2021]. Genellikle bir metalin süzülmesi nispeten düşük sıcaklıklarda, genellikle 200°C'nin altında gerçekleşir. Doğrudan veya dolaylı bir liç yöntemi olarak metalik elementler, oksijen, klor, iyot, brom, hidrojen peroksit vb. Varlığında uygun bir alkali veya asidik reaktifle liç edilir [Jha vd., 2013]. Tarihsel kayıtlara göre, birinci dünya savaşı sırasında, bu kimyasal liç yöntemi kullanılarak Almanya ve Belçika'dan elde edilen rastgele metallere elde edilen pirinç üretimi için çinkoya büyük ihtiyaç vardı [Habashi, 2005]. Aslında platin metali, belirli oksitleyici koşullar altında, belirli iyon değişimi ve hidroklorik asit, sülfürik asit, nitrik asit ve iyot çözeltileri gibi farklı çözücüler kullanılarak bu yöntemin kullanılmasıyla liç yapılabilir [Jha vd., 2013]. Birkaç farklı kimyasal kullanılarak gerçekleştirilebilir ve çevresel sürdürülebilirliğini ve kimyasal bileşim, sürecin ekonomisini direkt olarak etkilebilmektedir [Wordsworth vd., 2021]. Kimyasal liçte başlıca beş tür liç ayırt edilmiştir: Siyanür liçi, Halide liçi, Tiyosülfat liçi, Tiyoüre liçi ve Aqua regia liçi.

2.10.3. Pirometalurji

Pirometalurji, endüstriyel olarak kullanılan bir teknoloji olup, e-atıklardan metal ve değerli metallerin geri kazanımını için geleneksel bir ısıtma sürecidir. Pirometalurjik işlemler, yakma, eritme, yakma, cüruf oluşturma, sinterleme ve yüksek sıcaklıklarda eritme yoluyla cüruf, çamur, kül ve diğer ürünler gibi birçok katı kalıntı üretmektedir. Ayrıca cüruflar toksik elementler içerebilir, bu da bunların güvenli bir şekilde işlenmesini gerektirir [Potysz ve Kierczak, 2019]. Metalik oksitler, özel tasarlanmış yakma fırınları, yüksek fırınlar ve plazma ark fırınlarında, odun kömürü veya kok gibi indirgeyici maddelerle reaksiyona girerek karbon dioksit (CO₂) açığa çıkarır [Priya ve Hait, 2017]. Eritme, hurdanın genellikle flaş veya banyo eritme yoluyla eritildiği fırınlarda gerçekleşir. Hava ve oksijenin yanı sıra alüminyum oksit, kalsiyum oksit, silikon dioksit ve kalsiyum oksit de prosesin ana girdileridir [Castro ve Bassin, 2022]. Ciddi bir not olarak, diğer iki metal geri kazanım tekniğiyle karşılaştırıldığında pirometalurji olarak büyük hava kirliliğine neden olmaktadır. Hatta bir çalışmada elektronik atıkların eritilmesinin çok sayıda zararlı bileşik polibrominlenmiş dibenzofuranlar, naftalin, bifenil, dibromobenzen, dibenzopdioksin gibi gazlar yaydığı kaydedilmiştir. tribromobenzen, polibromlu dibenzodioksinler, dibenzodioksin vb. Elektronik atıkların açık alanlarda yakılarak işlenmesi, cıva, çinko ve poliklorlu dibenzodioksinler ile dibenzofuranlar gibi büyük miktarlarda toksik ağır metallerin salınmasına neden olmaktadır. Bu durumun, sağlık ve çevre üzerinde ciddi sorunlara yol açtığını gösteren kanıtlar mevcuttur. Bu süreçte, nihai ürünün verimi düşüktür ve cürufta, refrakterlerde veya toz halinde kaybolan daha yüksek metal kayıplarına neden olur [Priya ve Hait, 2017].

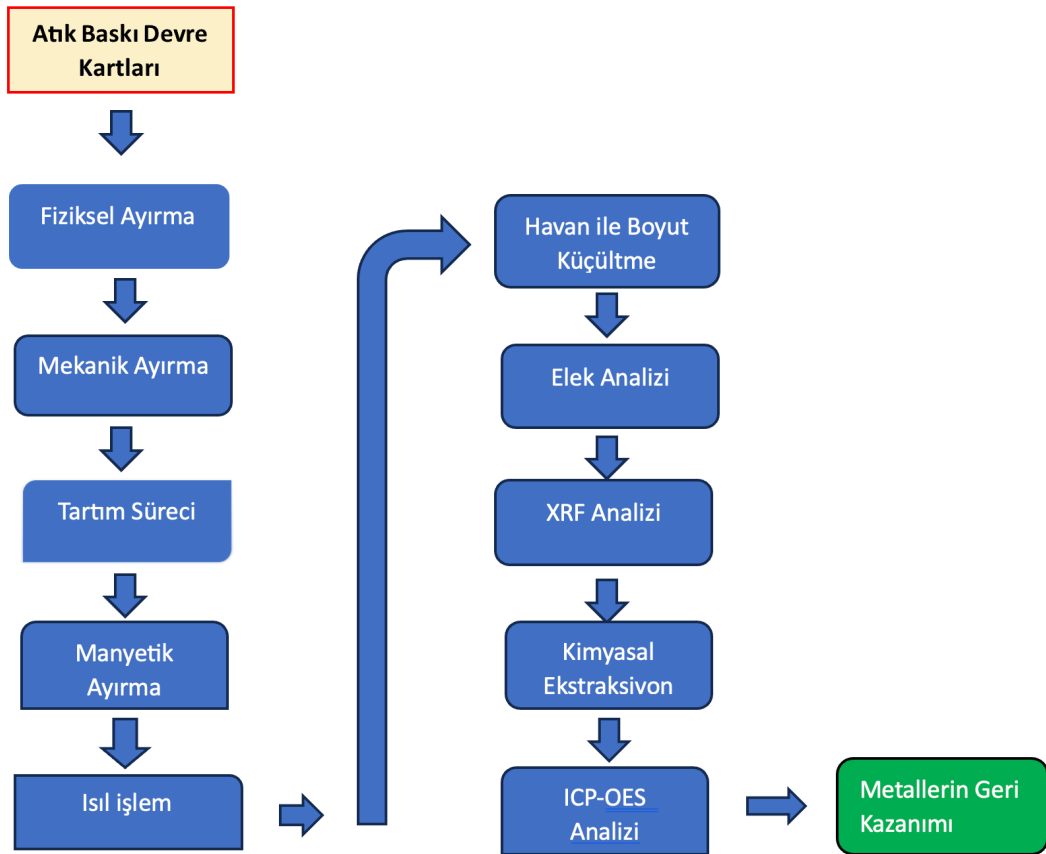
2.10.4. Biyo-hidrometalurji

Bu alan, Biyohidrometalurji ya da biyoliç, mikroorganizmaların ve onların ürettiği metabolik maddelerin kullanılmasıyla, katı malzemelerden metal iyonlarını ayırma işlemidir. Bu süreç, metallerin çözünmesine ya da çözünür metal kompleksleri ve şelatların oluşumuna yol açar. Biyohidrometalurji, çevre dostu bir yöntem olduğu için genellikle elektronik atıkların geri dönüşümünde "yeşil teknoloji" olarak kabul edilir. [Xia vd., 2018]. Biyohidrometalurji uygulamalarında, birincil/ikincil metal kaynaklarından metallerin ayrılma verimliliğine bağlı olarak, kemolitotototrofik

asidofiller, heterotrofik bakteriler, arkea ve heterotrofik mantarlar gibi çeşitli mikroorganizmalar kullanılmaktadır [Johnson ve Plessis, 2015]. Sülfür minerallerinin çözünmesini sağlamak amacıyla kullanılan mikroorganizmalar genellikle doğada kemolitotrofik özellik taşır, yani büyümek için inorganik maddelere ihtiyaç duyarlar. Bu inorganik besin kaynakları genellikle çevredeki ortamlardan temin edilir. Laboratuvarlarda ve sanayide yaygın olarak kullanılan 9K kültür ortamı, azot, fosfor, magnezyum ve diğer tuzların bir kombinasyonundan oluşur. Bu kültür ortamı, pH, oksidasyon-redüksiyon potansiyeli (ORP) ve bakteri sayıları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [Jafari vd., 2019]. Ancak Metal geri dönüşümünde bakteri kullanımı büyük ölçekli uygulamalarda yaygın değildir. Metal çözmede ve elektronik atıklardan altın kazanımında kullanılmaktadır. Süreç diğerlerine kıyasla oldukça az atık ve toksik gaz üretmektedir. Biyo-hidrometalurjik işlemler, metallerin farklı bakteri kültürleri tarafından liç işlemini içerir. Bu işlemin en önemli dezavantajları çok uzun liç süresi ve metal içeriğinin üst tabakada bulunması gerekliliğidir, bakteriler alt tabakalara ulaşamamaktadır [Veit ve Bernardes, 2015].

3.MATERYAL VE METOT

Atık baskılı devre kartlarının geri kazanım süreci, belirli adımlardan oluşmaktadır. İlk olarak fiziksel ayırma ile devre kartlarındaki büyük parçalar ayrılır. Ardından, mekanik ayırma işlemi yapılır ve malzemeler özelliklerine göre ayrıştırılır. Bu adımları takiben, malzemeler tartım süreci ile analiz edilmek üzere ölçülür. Sonrasında manyetik ayırma ile manyetik özelliklere sahip metaller toplanır. Isıl işlem aşamasında ise, materyaller termal yöntemlerle işlenir. İşlemin ardından, materyaller boyut küçültme yöntemi ile daha küçük parçalara ayrılır ve elek analizi ile sınıflandırılır. XRF analizi yardımıyla kimyasal bileşimler belirlenir. Daha sonra kimyasal ekstraksiyon ile metaller çözülerek geri kazanılır ve son olarak, ICP-OES analizi ile geri kazanılan metaller analiz edilerek saflaştırma işlemi gerçekleştirilir. Bu çalışmanın aşamaları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Deneysel çalışmaların aşamaları.

3.1. Materyallerin Temini ve Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında kullanılan anakartlar, 1990'lı yıllardan kalma masaüstü bilgisayarlardan elde edilmiştir. Özellikle, bu anakartlar AT form faktörüne sahip olup, uzun süredir atıl durumda olan eski bilgisayar kasalarından çıkarılmıştır. Anakartlar, geri dönüşüm ve AEEE yönetimi alanında faaliyet gösteren özel bir firma aracılığıyla temin edilmiştir. AT anakartların incelenmesi sürecinde, çalışma sistematik olarak yürütülmüş ve anakartlar Anakart-1 ve Anakart-2 olarak iki ayrı gruba ayrılmıştır. Bu ayırım, anakartların yapısal farklılıklarını ve potansiyel bileşen zenginliklerini daha detaylı analiz edebilmek amacıyla yapılmıştır. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında, bu anakartlar üzerindeki metallerin ve diğer elektronik bileşenlerin geri kazanılabilirliği araştırılacaktır. Şekil 3.2'de de gösterildiği üzere, bu iki anakart grubu, kullanılan yöntemlerin ve geri kazanım stratejilerinin karşılaştırılmasına olanak tanıyacak şekilde detaylı bir incelemeye tabi tutulmuştur.



Şekil 3.2: Anakart-1 ve Anakart-2 numuneleri.

3.2. Materyallerin Fiziksel Ayrımı

Anakart ABDK'si üzerindeki devre elemanları (kondansatörler, dirençler, metal soğutucu plakalar, kablolar vb.) ayrıştırma işlemi, manuel el aletleri yardımıyla dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Özellikle, pense, tornavida, spatula ve keski gibi yardımcı el aletleri kullanılarak bu elemanlar anakart üzerinden çıkarılmıştır. Bu tür kaba devre elemanlarının sökülmesi, ileride yapılacak analizler için anakart bileşenlerini ayrı bir şekilde değerlendirme imkânı sağlamaktadır.

Sökülen anakart bileşenleri, daha sonra hassas tartım işlemi için ayrıştırılarak gruplandırılmıştır. Gruplandırma işlemi, anakartın farklı materyal ve bileşenlerinin geri kazanım süreçlerine yönelik detaylı bir analiz yapılmasını kolaylaştırmak amacıyla yapılmıştır. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, bu bileşenlerin ayrı ayrı sınıflandırılması, hem doğru ölçümler yapılmasına hem de geri dönüşüm verimliliğini artırmak için gerekli veri setlerinin elde edilmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 3.3: Anakart-1 ve Anakart-2 numunelerinden sökülen malzemeler.

Anakart ABDK'sinden el aletleri yardımıyla sökülen bileşenler ELTRA84 markalı hassas terazi ile ayrı ayrı tartılmıştır. Tartım sonuçları, Anakart-1 ve Anakart-2 numuneleri için ayrı ayrı hazırlanmış ve sonuçlar sırasıyla Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de listelenmiştir.

Tablo 3.1: Anakart-1 Numunesine ait devre elemanlarının ilk tartım sonuçları.

S.N	Devre Elemanları	Ağırlık (gram)
1	Pil yuvası soketi ve güç çıkışları	5,75
2	İşlemci,güney ve kuzey köprüsü pinleri	31,57
3	Ram slotları	48,21
4	Güç giriş soketleri	18,05
5	Kuzey köprüsü ve İşlemci soğutucusu ve koruyucuları	124,61
6	Portlar ve Konnektörler	66,80
7	Pci yuvası soketleri	23,55
8	Kondansatörler	12,70
9	Diyot ve Transistörler	6,01
10	Bobinler	9,25
11	Kristal Osilatorler	13,13
12	Dirençler ve Söküm sırasında açığa çıkan metal parçalar	12,64
13	Toplam	372,27

Tablo 3.2: Anakart-2 numunesine ait devre elemanlarının ilk tartım sonuçları.

S.N	Devre Elemanları	Ağırlık (gram)
1	Pil yuvası soketi ve güç çıkışları	5,01
2	İşlemci, güney ve kuzey köprüsü pinleri	15,49
3	Ram slotları	26,77
4	Güç giriş soketleri	17,82
5	Kuzey köprüsü ve İşlemci soğutucusu ve koruyucuları	90,58
6	Portlar ve konnektörler	69,72
7	Pc1 yuvası soketleri	23,57
8	Kondansatörler	31,52
9	FET, Diyotlar ve Transistörler	7,67
10	Bobinler	9,57
11	Kristal Osilatorler	11,52
12	Söküm sırasında açığa çıkan metal parçalar	6,23
13	Toplam	315,47

Bileşenlerinden ayrılmış olan anakart, Şekil 3.4'te görsel olarak sunulmuştur. Bu aşamada, anakart üzerindeki tüm devre elemanları ve diğer bileşenler sökülerek anakartın yalnızca yapısal kısmı bırakılmıştır. Bileşenlerin sökülmesi, anakartın metal, plastik ve diğer geri dönüştürülebilir malzemelerinin ayrıştırılmasına olanak tanımış ve çevresel etkilerin azaltılması amacıyla bu materyallerin ayrı olarak işlenmesini mümkün kılmıştır.



Şekil 3.4: Bileşenlerinden ayrılmış anakart numunesi.

3.2.1. Materyallerin Manyetik Ayrımı

Anakartların sökümünden elde edilen demir içerikli malzemeler, manyetik ayırım yöntemi kullanılarak ayrıştırılmıştır. Bu işlem sırasında mıknatıslar yardımıyla demir

yoğunluklu bileşenler diğer malzemelerden ayrılmış ve geri kazanım işleminin dışına çıkarılmıştır.

3.2.2. Materyallerin Boyut Küçültmesi

Bileşenleri ayrıştırılmış ABDK, boyut küçültme işleminden önce paslanmaz çelik bir sac kesme makası kullanılarak yaklaşık 4 cm x 4 cm'lik parçalar halinde kesilmiştir. Kesilen parçalar iki aşamalı mekanik öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Boyutları küçültülen anakart numuneleri Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Boyutları küçültülen Anakart-1 ve Anakart-2 numuneleri.

3.3. Materyallere Isıl İşlem Uygulanması

Anakart numunesine ait boyutları küçültülen ABDK ve devre elemanları, 1000 °C sıcaklığa kadar ulaşan pürmüz yardımıyla 30 dakika boyunca ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem, materyallerin yapısal değişimlerini hızlandırarak metallerin ayrışmasını sağlamıştır. Isıl işlem sırasında, yüksek sıcaklıkta metal bileşenlerin ayrışması ve malzemenin daha sonra yapılacak analizler için uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır. Isıl işlem sonrasında, materyaller kaplara alınarak soğumaya bırakılmıştır. Soğuma sürecinin tamamlanmasının ardından elde edilen materyaller, Şekil 3.6'da görsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6: (a) Isıl işlem anı-1,(b) Isıl işlem anı-2 ve (c) Isıl işlem sonrası.

Pürmüz ile Isıl işleme tabi tutulan Anakart ABDK'si içerisinde bulunan bakırlar el ile ayrıldı. Isıl işlemi tam olarak gerçekleşmeyen karbonlu metal bileşikleri Şekil 3.7'de gösterildiği gibi MAGMA THERM markalı fırında 1300 °C 4 saat fırılandıktan sonra sonrasında soğumaya bırakıldı.



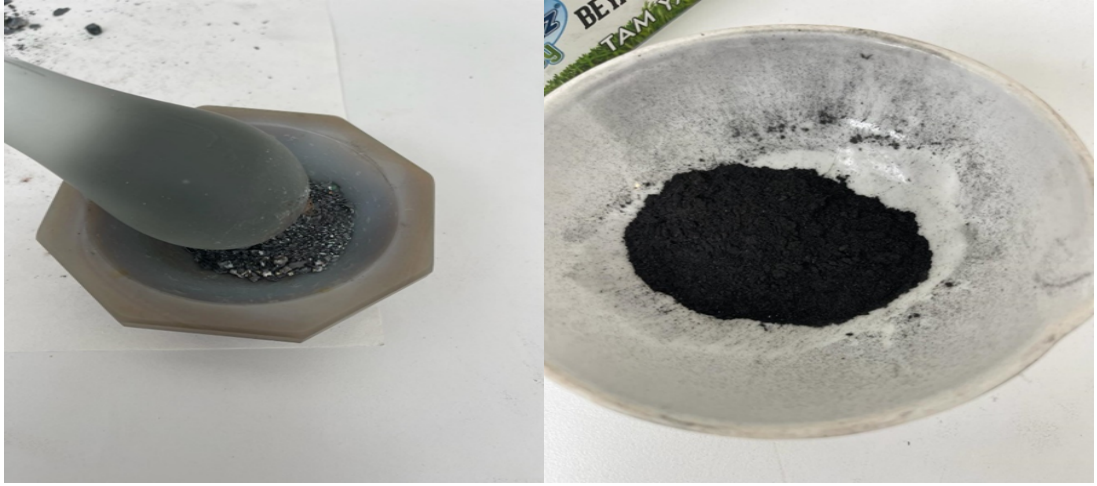
Şekil 3.7: Isıl işleme tabi tutulan anakart numuneleri.

3.4. Materyallerin Hidrometalurjik Reaksiyona Hazırlanması

Isıl işleme tabi tutulan anakart ABDK'leri saklama kapları içerisinde Gebze Teknik Üniversitesi Yer ve Deniz bilimleri laboratuvarına getirildi.

Hidrometalurjik reaksiyona hazırlanması için gelen materyaller Şekil 3.8'de gösterildiği gibi havan yardımıyla istenen boyutlara getirilmek üzere hazırlanmıştır.

Her iki gruba ait ürünler Havan yardımıyla boyutları 2 mm'den daha küçük boyutlara küçültülmüştür. Anakart ABDK'sine ait tam yanması gerçekleşmeyen karbonlu metal bileşikleri el ile ayrılmıştır.



Şekil 3.8: Havan yardımıyla boyutları küçültülen numuneler.

Havan ile boyutları küçültülen metal karışımli tozlar 45 Numaralı 2 mm göz açıklığına sahip elek ile elenip XRF analizleri yapılmak üzere her anakart için dört fraksiyona ayrılmıştır.

3.4.1. Materyallerin Elek Analizi

Elek analizi, toprak, inşaat malzemeleri ve diğer parçacıklı maddelerin parçacık boyutlarının belirlenmesi için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu süreç, numunenin çeşitli boyutlarda deliklere sahip eleklerle yerleştirilmesi ile başlar. Numunenin her elek üzerindeki kalıntı miktarı titizlikle ölçülür. Böylece, farklı boyut aralıklarındaki parçacıkların toplam ağırlıkları veya hacimleri belirlenebilir. Bu ölçümler, numunenin

paracak boyutlarının dağılımını ortaya koyar ve bu dağılım grafikleri veya tabloları halinde sunulur.

Elek analizi, özellikle inşaat mühendisliği ve madencilik sektörlerinde malzeme kalitesinin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynar. Örneğin, zemin mühendisliğinde, toprak veya kum karışımlarının yapısal özelliklerini anlamak için kullanılır. Beton retiminde ise, agregaların uygun boyutta olup olmadığını belirlemek için bu analizden yararlanılır.

Elde edilen sonuçlar, malzemenin fiziksel özellikleri hakkında önemli bilgiler sunar. Ancak, malzemenin kimyasal bileşimini anlamak için XRF (X-Ray Floresans) gibi diğer analitik yöntemlerle kombine edilebilir. XRF, malzemenin elementel bileşimini belirlerken, elek analizi fiziksel boyutları ortaya koyar. Bu iki yöntemi birlikte kullanabilmek için numuneleri 2 mm göz açıklığına sahip elek ile eleme işlemine gerçekleştirildi. İstenen boyutlara getirilen numuneler şekil 3.9’da gösterilmiştir.



şekil 3.9: Anakart-1 ve Anakart-2 numunelerine ait metal tozları.

Boyutları 0.2 mm’e yakın boyutlara getirilen numuneler UWE UAA-2201 markalı Hassas terazi yardımıyla tartılmıştır. Tartım sonuçları Tablo 3.3 ve Tablo 3.4’da listelenmiştir.

Tablo 3.3: Isıl işlem sonrası Anakart-1 numunelerine ait hassas tartım sonuçları.

S.N	Anakart-1 Numunesi	Ağırlık (gram)
1	Baskılı devre kartı	210,02
2	İşlemci, entegre ve pinler	11,86
3	Anakart üzerinden slotlar ve soketler	18,11
4	Anakart üzerindeki devre elemanları	16,54
5	Anakart Devre Elemanlarının üzerinde bulunan seramik parçalar	4,00
6	TOPLAM	260,53

Tablo 3.4: Isıl işlem sonrası Anakart-2 numunelerine ait hassas tartım sonuçları.

S.N	Anakart-2 Numunesi	Ağırlık (gram)
1	Baskılı devre kartı	207,12
2	İşlemci, entegre ve pinler	26,04
3	Anakart üzerinden slotlar ve soketler	44,20
4	Anakart üzerindeki devre elemanları	18,43
5	Anakart Devre Elemanlarının üzerinde bulunan seramik parçalar	10,00
6	TOPLAM	305,79

3.5. XRF Analizleri

XRF cihazının temel çalışma prensibi, malzemeden yayılan floresan X-ışınlarının analiz edilmesine dayanır. XRF analizinde cihaz, örneğe yüksek enerjili X-ışınları gönderir. Bu X-ışınları, örnekteki atomların iç yörüngelerindeki elektronları yerinden çıkarır ve boş bir elektron yörüngesi oluşturur. Daha yüksek enerjili yörüngelerde bulunan bir elektron, bu boşluğu doldurmak için aşağı seviyeye geçerken fazla enerjiyi X-ışını olarak yayar. Bu X-ışınlarına "floresan X-ışınları" denir ve her elementin yaydığı X-ışını enerjisi kendine özgüdür. XRF cihazı, örnekten gelen bu floresan X-ışınlarını algılar ve her elementin yaydığı karakteristik X-ışını enerjisini ölçer. Böylece, numunede hangi elementlerin bulunduğu tespit edilir. Cihaz, örnekten gelen X-ışınlarının enerjilerini ve yoğunluklarını analiz ederek, her bir elementin hem varlığını hem de konsantrasyonunu belirler. XRF cihazında, bir dedektör sistemi gelen X-ışınlarının enerji seviyelerini ve spektral çizgilerini ölçer. Bu sayede hangi elementin numunede bulunduğu kesin olarak belirlenebilir. Spektral analiz sırasında cihaz, her elementin karakteristik dalga boylarını veya enerji seviyelerini inceleyerek elementel kompozisyonu ortaya çıkarır. Çoğunlukla silikon, germanyum veya benzeri

malzemelerden yapılan dedektörler kullanılır ve bu dedektörler, her bir elementin spesifik enerji seviyelerine karşı hassas bir şekilde çalışır. XRF cihazı, her elementin yaydığı X-ışını fotonlarının enerjilerini sayarak ve ölçerek analitik bir sonuç verir. Elementlerin yoğunluğu, bu X-ışını fotonlarının sayısı ile doğru orantılıdır, bu da cihazın sadece nitel (hangi elementler var) değil, aynı zamanda nicel (elementlerin miktarları) analiz yapmasına olanak tanır [Szalóki, 2006].

Gebze Teknik Üniversitesi Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü Laboratuvarında bulunan Rigaku ZSX Primus IV markalı XRF cihazına yerleştirilen numunelerin analizi gerçekleştirildi. Analizde okunan değerler Tablo 3.5 ve Tablo 3.6’de gösterilmiştir.

Mekanik işlemlere tabi tutulan Anakart-1 ve Anakart-2 numuneleri kendi içerisinden dört ayrı fraksiyona ayrılmıştır. Bu numuneler XRF analizi için 2 mm göz açıklığına sahip eleklerde elendikten sonra her analiz için 10 gramlık ölçülerde numuneler tartılıp analize için hazırlanmıştır.

Tablo 3.5: Anakart-1 numunesi ait XRF analiz sonuçları.

Numuneler Elementlerin Yüzde (%) Değerleri	Anakart -1 Numuneleri			
	İşlemci ve Pinler	Devre Elemanı	Anakart	Anakart Soket ve Slotları
Bakır(Cu)	4,52	1,32	6,26	6,20
Alüminyum (Al)	13,40	9,20	15,30	14,30
Demir (Fe)	2,98	1,04	0,74	0,85
Titanyum (Ti)	0,93	2,51	1,00	0,78
Kalay (Sn)	1,41	0,79	1,31	1,82
Çinko (Zn)	0,63	3,76	0,89	0,48
Antimon (Sb)	0,00	11,10	0,00	0,00
Platin (Pt)	0,00	0,13	0,00	0,00
Silisyum (Si)	41,7	33,40	42,20	42,30
Baryum (Ba)	4,49	1,17	1,29	0,00
Kalsiyum (Ca)	26,40	32,50	28,10	30,60
Kükürt (S)	0,77	0,11	0,29	0,20
Fosfor (P)	1,16	0,13	1,30	1,12
Diğer Elementler	1,61	2,84	1,32	1,35

Tablo 3.6: Anakart-2 numunesi ait XRF analiz sonuçları.

Numuneler Elementler Yüzde (%) Değerleri	Anakart -2 Numuneleri			
	1. İşlemci ve Pinler	2. Devre Elemanı	3. Anakart	4. Anakart Soket ve Slotları
Bakır (Cu)	8,29	2,18	9,61	3,78
Alüminyum (Al)	9,88	10,50	13,90	14,00
Demir (Fe)	6,52	1,38	1,27	5,11
Titanyum (Ti)	0,00	2,57	1,02	0,44
Kalay (Sn)	2,08	0,83	4,33	0,80
Çinko (Zn)	1,59	1,85	0,33	0,73
Antimon (Sb)	0,00	3,70	0,00	0,00
Platin (Pt)	0,00	0,00	0,00	0,00
Silisyum (Si)	47,80	40,10	41,10	44,00
Baryum (Ba)	10,30	0,00	0,00	2,89
Kalsiyum (Ca)	10,10	33,10	26,10	25,90
Kükürt (S)	1,39	0,17	0,17	0,00
Fosfor (P)	0,87	0,17	1,05	1,22
Diğer Elementler	1,18	3,45	1,45	1,13

Her iki grafiği karşılaştırarak, farklı anakart bileşenlerindeki metal elementlerin dağılımlarını analiz edebilir ve karşılaştırılabilir. Bu karşılaştırma, iki anakartın üretiminde kullanılan materyallerin işlevselliğini, tasarım önceliklerini ve olası teknolojik farkları anlamamıza yardımcı olacaktır.

3.5.1. Bakır (Cu) Kullanımı

Anakart - 1: Bakırın anakartın kendisinde (%6,26) ve slot/soketlerinde (%6,20) belirgin bir şekilde kullanıldığı görülüyor. İşlemci ve pinlerde ise %4,52 oranında yer alıyor.

Anakart - 2: Bakır oranı işlemci ve pinlerde (%8,29) ve anakartın kendisinde (%9,61) daha yüksek. Ancak slot ve soketlerde bu oran %3,78'e düşmüş.

Bakır, elektrik iletkenliği açısından kritik bir malzemedir ve devrelerde sinyallerin hızlı ve verimli bir şekilde taşınması için tercih edilir. İlk anakartta bakır, tüm bileşenlere daha dengeli dağılmışken, ikinci anakartta işlemci ve anakartın kendisinde daha yoğun kullanılmıştır. Bu durum, ikinci anakartın işlemci hızına ve anakart performansına odaklandığını gösterebilir. Ancak slot ve soketlerde bakır kullanımının azalması, bu

bölgelerde iletkenlik ihtiyacının diğer malzemelerle karşılanabileceğini veya maliyetin düşürülmesi için bir optimizasyon yapıldığını gösterir.

3.5.2. Kalay (Sn) Kullanımı

Anakart - 1: Kalay, özellikle anakartın slot ve soketlerinde (%1,82) daha yüksek oranda kullanılmıştır.

Anakart - 2: Kalay oranı anakartın kendisinde (%4,33) ve işlemci/pinlerde (%2,08) daha yüksek düzeylere çıkmıştır.

Kalay, özellikle lehimleme işlemlerinde tercih edilen bir malzemedir. İlk anakartta daha çok slot ve soketlerde kullanılırken, ikinci anakartta anakartın genel yapısında ve işlemci/pinlerde daha fazla kullanılmış. Bu durum, ikinci anakartın lehimleme teknolojilerinde daha ileri bir yapı sergilediğini veya lehim bağlantılarının dayanıklılığının artırıldığını gösterir.

3.5.3. Çinko (Zn) Kullanımı

Anakart - 1: Çinko, devre elemanlarında %3,76 ile en yüksek oranda bulunur.

Anakart - 2: Çinko oranı her bileşende daha düşük seviyelerdedir. Devre elemanlarında %1,85, slot ve soketlerde %0,33 oranındadır.

Çinko, korozyona karşı koruma sağlama amacıyla kullanılır. İlk anakartta çinko oranları daha yüksekken, ikinci anakartta bu oranlar oldukça düşmüştür. Bu, ikinci anakartın daha az korozyon riski taşıyan ya da farklı bir koruma teknolojisine sahip olduğunu gösterebilir.

3.5.4. Titanyum (Ti) Kullanımı

Anakart - 1: Titanyum, devre elemanlarında %2,51 ile en yüksek oranda kullanılmış, diğer bileşenlerde daha düşük seviyelerdedir.

Anakart - 2: Devre elemanlarında %2,57 ile benzer seviyelerde kalmış, ancak anakartın kendisinde (%1,02) de kullanılmıştır. Slot ve soketlerde %0,44 gibi düşük bir oran vardır.

Titanyumun her iki anakartta da devre elemanlarında yoğunlaşması, bu bileşenlerin termal dayanıklılık ve hafiflik açısından optimize edildiğini gösterir. Titanyum, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı ile bilinir, bu da devre elemanlarında aşırı ısınmanın önüne geçmek için kullanıldığını gösterir.

3.5.5. Alüminyum (Al) Kullanımı

Anakart - 1: Alüminyum, tüm bileşenlerde %9,20 ile %15,30 arasında değişen oranlarda kullanılmıştır. Anakartta en yüksek (%15,30) seviyede bulunur.

Anakart - 2: Alüminyum, anakartın slot ve soketlerinde %14 ve anakartın kendisinde %13,90 oranında bulunur. İşlemci ve pinlerde %9,88, devre elemanlarında ise %10,50 ile daha dengeli bir dağılım gösterir.

Alüminyumun her iki anakartta da yoğun şekilde kullanılması, bu malzemenin hafifliği ve korozyon direnci gibi avantajlarını öne çıkarır. Özellikle anakartın kendisinde ve slot/soketlerinde yüksek oranda bulunması, geniş yüzeylerde ısının etkili bir şekilde dağıtılması ihtiyacına işaret eder. İkinci anakartta alüminyumun daha dengeli bir şekilde dağıtılması, tüm bileşenlerin mekanik dayanıklılığı ve termal yönetimi açısından optimize edildiğini gösterir.

İki tabloyu karşılaştırdığımızda, her iki anakartın da malzeme kullanımında belirgin farklar olduğunu görüyoruz. Anakart-2, daha fazla demir ve bakır kullanarak elektromanyetik dayanıklılığa ve iletkenliğe daha fazla vurgu yapmış gibi görünüyor. Ayrıca kalay oranının yüksekliği, ikinci anakartın daha gelişmiş lehimleme teknolojilerini kullandığını gösterir. Öte yandan, anakart-1 daha dengeli ve optimize edilmiş bir malzeme dağılımına sahip, özellikle çinko oranının yüksek olması, korozyon direncinin daha fazla ön planda olduğunu düşündürüyor.

Bu farklılıklar, iki anakartın üretim teknolojilerinde ve hedef kullanım alanlarında çeşitlilik olduğunu gösterir. Birinci anakart, genel olarak dayanıklılık ve korozyon direncine odaklanmışken, ikinci anakart performans, elektromanyetik özellikler ve lehimleme dayanıklılığı açısından optimize edilmiştir. İkinci anakart daha performans odaklı ve yüksek iletkenlik gerektiren uygulamalara yönelik olabilirken, birinci anakart daha çok uzun ömürlü ve dayanıklı bir yapı sunmak üzere tasarlanmış olabilir.

Sonuç olarak, her iki anakart da farklı kullanım amaçlarına ve tasarım önceliklerine göre optimize edilmiş malzemelerle üretilmiştir.

3.5.6. Anakart Yüzeyi İçin Yapılan Çalışma

Deney sırasında, atık baskılı devre kartı (anakart) yüzeyinden alınan numunenin XRF analizi sonucunda, numunenin yaklaşık %75 oranında bakır içerdiği tespit edilmiştir. Bu oran, bakırın geri kazanımı açısından büyük bir potansiyele işaret etmektedir. Bakır, özellikle elektrik ve elektronik sektöründe yaygın olarak kullanılan, yüksek iletkenlik özelliği ve dayanıklılığıyla bilinen kritik bir metaldir. Bu nedenle, elektronik atıklarda bulunan yüksek miktardaki bakır, geri dönüşüm süreçlerinde değerli bir kaynak olarak ön plana çıkmaktadır. Atık baskılı devre kartlarından elde edilebilecek bu tür metaller, doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunurken, madencilik faaliyetlerine olan bağımlılığı da azaltmaktadır. %75 gibi yüksek bir bakır oranına sahip bu numune, elektronik atıkların yalnızca çevresel bir sorun değil, aynı zamanda önemli bir metal kaynağı olduğunu göstermektedir. Bu kaynakların geri kazanılması, hem ekonomik açıdan kârlı hem de çevre dostu bir yaklaşımı desteklemektedir. Geri kazanılan bakırın yeniden kullanımı, özellikle elektronik üretiminde, enerji iletiminde ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda tekrar değerlendirilebilir. Bu da elektronik atıkların, etkin bir şekilde işlendiğinde, sürdürülebilir bir kaynak olarak kullanılabileceğini kanıtlamaktadır. Anakart yüzey numunesinin XRF sonucu Tablo 3.7’de gösterilmiştir.

Tablo 3.7: Anakart yüzey numunesine ait analiz sonucu.

Numune Elementler Yüzde (%) Değerleri	Anakart ABDK’si Yüzeyinden Alınan Numune
Bakır (Cu)	74,90
Alüminyum (Al)	8,54
Demir (Fe)	1,25
Titanyum (Ti)	0,00
Kalay (Sn)	0,99
Çinko (Zn)	6,44
Antimon (Sb)	0,00
Platin (Pt)	0,00
Silisyum (Si)	5,39
Baryum (Ba)	0,52
Kalsiyum (Ca)	1,34
Kükürt (S)	0,19
Fosfor (P)	0,22
Diğer Elementler	0.22

3.6. Hidrometalurjik Yöntemler

Bu çalışmada için ayrılan numuneler Tablo 3.8’de, kullanılan kimyasallar Tablo 3.9’da ve kullanılan malzemeler Tablo 3.10’da listelenmiştir.

Tablo 3.8: Atık baskılı devre kartı numune içerikleri.

Anakart-1 Numuneleri	Anakart-2 Numuneleri
1/1 İşlemci ve Pin Liçi	2/1 İşlemci ve Pin Liçi
1/2 Devre Elemanları Liçi	2/2 Devre Elemanları Liçi
1/3 Anakart Liçi	2/3 Anakart Liçi
1/4 Soket ve Slot Liçi	2/4 Soket ve Slot Liçi

Tablo 3.9: Kimyasalların listesi.

Kimyasallar	Marka
Sülfürik asit	%97, APEKS
Saf su	Stabilize, TEKKİM

Tablo 3.10: Kullanılan malzemelerin listesi.

Malzemeler
Erlenmeyer Şişesi
Pipet
Balon Joje
Santrifüj Tüpleri
Huni
Kaba Filtre

Bu çalışmada, boyutları istenen seviyeye getirilen her bir numune için ayrı ayrı sülfürik asit çözeltileri 1 molar (1 M) konsantrasyonunda hazırlanarak deneyin temel çözeltisi olarak kullanılmıştır. Deneysel prosedürde kullanılan ABDK numunesi, özellikle elektronik atıkların geri dönüşümünde ve değerli metal geri kazanımında önem taşımaktadır. Bu numune, metal içeriği yüksek olduğundan dolayı asitli çözeltilerle işlenerek değerli metallerin çözündürülmesi hedeflenmiştir. Numunenin partikül boyutu, reaksiyon yüzey alanını maksimize etmek amacıyla 2,00 mm’den küçük olacak şekilde önceden hazırlanmıştır. İnce partiküller, daha büyük partiküllere oranla daha

hızlı reaksiyona girme eğilimindedir, bu yüzden partikül boyutu küçültülerek numunenin sülfürik asitle olan temas yüzeyi artırılmıştır.

Deneyde, 1 gram ağırlığındaki bu atık baskılı devre kartı numunesi, hassas bir şekilde tartılarak doğru sonuçlar elde edilmesi sağlanmıştır. Numune, 25 mL sülfürik asit çözeltisi ve 75 mL saf su ile birleştirilmiştir. Bu karışım, toplamda 100 mL'lik bir hacim oluşturmakta ve deney süresince asit konsantrasyonunun yeterli seviyede tutulmasını sağlamaktadır. Saf suyun eklenmesi, çözeltinin toplam hacmini artırırken aynı zamanda sülfürik asidin aşındırıcı etkisini de belirli bir düzeyde seyrelterek kontrollü bir reaksiyon ortamı yaratır.

Bu işlem sırasında numune ile sülfürik asit arasındaki katı-sıvı oranı sabit tutulmuştur. Özellikle her 1 gram katı numune için 25 mL sülfürik asit ve 75 mL saf su kullanılması, deneyin tekrarlanabilirliğini sağlamak ve farklı değişkenlerle yapılan denemeler arasında tutarlılık oluşturmak amacıyla yapılmıştır. Bu oran, metal toz numunesi ile sülfürik asit arasındaki oran olarak da ifade edilebilir ve bu çalışmada metal numunesinin sülfürik asit ile olan oranı 1:25 olarak belirlenmiştir. Yani her 1 birim ağırlığındaki metal toz numunesi için 25 birim sülfürik asit kullanılmıştır. Bu sabit oran, hem reaksiyonun dengeli bir şekilde ilerlemesini sağlamak hem de numuneden çözünebilecek maksimum metal miktarını elde etmek için seçilmiştir.

Sülfürik asit, güçlü bir mineral asit olup, özellikle bakır, nikel ve çinko gibi metallerin çözündürülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. ABDK gibi metal içeriği yüksek malzemelerde, sülfürik asit metal oksitlerle ve saf metallerle reaksiyona girerek metal sülfatlarını oluşturur ve metallerin sıvı faza geçmesine olanak tanır. Bu yüzden, deney sırasında kullanılan sülfürik asidin konsantrasyonu ve miktarı, geri kazanılacak metal miktarını doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir.

Bu deneysel süreçteki temel amaç, numunedeki metallerin sülfürik asit çözeltisiyle etkili bir şekilde reaksiyona girerek çözünmesini sağlamak ve sonrasında metal iyonlarının sıvı fazdan ayrıştırılması için gerekli koşulları oluşturmaktır. Saf su eklenmesi ile sülfürik asidin etkinliği düşürülmemiş, aksine çözeltinin hacmi artırılarak daha geniş bir yüzeyde daha fazla numune ile etkileşime girilmesi hedeflenmiştir. Böylece, daha geniş bir reaksiyon ortamı yaratılmış ve sülfürik asidin aşındırıcı etkisi daha kontrollü hale getirilmiştir. Reaksiyon giren numuneler Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

Sonuç olarak, metal numunesi ile sülfürik asit arasındaki sabit 1:25 oranı, hem reaksiyonun verimliliğini artırmak hem de numuneden maksimum metal çözündürülmesini sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Bu tür deneyler, e-atıkların geri dönüştürülmesi ve değerli metal geri kazanımı süreçlerinde kullanılabilecek yöntemlerin geliştirilmesine yönelik önemli bir adım teşkil etmektedir.



Şekil 3.10: Numunelerin reaksiyon işlemi.

Deneyin bu aşamasında, süzme işlemi, numune ve çözelti karışımı hazırlandıktan yaklaşık 24 saat bekletildikten sonra gerçekleştirilmiştir. Bu bekleme süresi, çözelti içerisindeki kimyasal reaksiyonların tam anlamıyla tamamlanmasını sağlamak amacıyla belirlenmiştir. Bu süre zarfında, sülfürik asit çözeltisi, atık baskılı devre kartı numunesiyle reaksiyona girerek, metal iyonlarının çözeltide serbest hale gelmesine katkıda bulunmuştur. Reaksiyon süresinin doğru bir şekilde ayarlanması, metal çözünürlüğünü maksimize etmek açısından kritik bir rol oynar. Bu nedenle, 24 saatlik bekleme süresi, metal iyonlarının tam olarak çözelti fazına geçmesini garanti altına almak için tercih edilmiştir.

Karışım yeterince reaksiyona girdikten sonra, süzme işlemi kaba bir filtre kullanılarak yapılmıştır. Kaba filtreler, büyük partiküllerin ve katı atıkların süzülerek çözeltiden ayrılmasını sağlar. Bu filtreleme işlemi, çözeltideki istenmeyen katı maddelerin uzaklaştırılmasını amaçlar ve çözeltiyi daha temiz bir hale getirir. Kaba filtre kullanımı, özellikle yüksek hacimli sıvıların süzülmesi için uygun olup, sürecin hızlı ve verimli

bir şekilde ilerlemesine olanak tanır. Filtrasyon süreci boyunca, katı numunenin çözünmeyen parçacıkları filtrede kalır ve yalnızca çözeltide çözünen metal iyonları filtrelenen sıvıda bulunur. Süzme İşlemi Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

Süzme işlemi tamamlandıktan sonra, elde edilen sıvı çözelti, belirli analizler için daha ileri işlemlerden geçirilir. Süzülen bu liç çözeltileri, yüksek hassasiyetli aletlerle analiz edilmek üzere hazırlanır. Liç çözeltilerinden numune almak için 1 mL’lik bir pipet kullanılmıştır. Pipet, laboratuvar çalışmalarında küçük hacimlerde sıvı alma ve aktarma işlemlerinde kullanılan hassas bir ekipmandır. Pipet kullanımı, doğru miktarda numunenin alınmasını sağlar ve analizlerin tutarlılığı açısından önem taşır. Bu aşamada kullanılan 1 mL’lik pipet, çözeltiden alınacak örnek miktarının hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır.

Alınan bu küçük hacimli sıvı numune, daha sonraki analizler için seyreltilir. Seyreltme işlemi, çözeltinin konsantrasyonunu belirli bir seviyeye düşürerek, analiz cihazlarının algılama kapasitesi içinde kalacak şekilde hazırlanmasını sağlar. Bu aşamada, özellikle ICP-OES analizleri için gerekli olan numune hazırlığı gerçekleştirilmiştir. ICP-OES, numunedeki elementlerin konsantrasyonlarını yüksek doğrulukla tespit edebilen bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, çözeltideki metal iyonlarının konsantrasyonlarını belirlemek için oldukça etkilidir ve metal geri kazanım çalışmalarında sıkça kullanılır.

Numune seyreltilip ICP-OES cihazına uygun hale getirildikten sonra, çözeltideki metal konsantrasyonları analiz edilmeye hazır hale gelmiştir. Bu analiz, çözeltide çözünen metallerin miktarını belirleyerek, sülfürik asit çözeltisiyle yapılan liç işleminin etkinliğini değerlendirme fırsatı sunar. Böylece, deney boyunca elde edilen veriler, metallerin çözünürlüğü, geri kazanılabilirliği ve asitli çözeltinin verimliliği hakkında önemli bilgiler sağlar.

Sonuç olarak, süzme işlemi ve sonrasında uygulanan numune alma ve seyreltme adımları, çözeltide bulunan metal iyonlarının doğru ve hassas bir şekilde analiz edilmesi için gereklidir. Bu adımlar, metal geri kazanım çalışmalarının temelini oluşturan ve numunenin kimyasal bileşenlerini anlamaya yönelik önemli basamaklar olarak kabul edilir. ICP-OES analizine hazırlanan süzülen sıvı, metal içeriklerinin miktarını tespit etmek için güvenilir bir yöntem sunar ve bu sayede deneysel sonuçların daha doğru bir şekilde elde edilmesini sağlar.



Şekil 3.11: Numunelerin kaba filtreden süzme işlemi.

3.7. Bulgular ve Tartışma

3.7.1. ICP-OES Analizi

ICP-OES cihazının çalışma prensibi, deney örneğinin önce sıvı formda bir aerosol haline getirilmesiyle başlar. Bu aerosol, plazma ortamına enjekte edilir. Plazma, genellikle argon gazı kullanılarak oluşturulur ve bu gaz, yüksek frekansta bir elektromanyetik alan ile ısıtılarak yaklaşık 10.000 Kelvin sıcaklıklara ulaşan bir ortam yaratır. Bu aşırı sıcak plazma, numunedeki atomları ve iyonları uyarır ve onları daha yüksek enerji seviyelerine çıkarır. Atomlar ve iyonlar, uyarılma sonrasında daha düşük enerji seviyelerine geri dönerken karakteristik dalga boylarında ışık yayarlar. Bu ışık, her element için kendine özgü spektral çizgiler oluşturur. Cihazın dedektörleri bu ışığın dalga boylarını ve yoğunluklarını ölçerek, numunede hangi elementlerin bulunduğunu ve her bir elementin konsantrasyonunu belirler. ICP-OES cihazları, bu emisyon çizgilerini analiz ederek elementlerin kimliğini ve miktarını hassas bir şekilde tespit eder. Optik sistem, yayılmakta olan ışığı spektrometreye ileterek elementlerin tayfını çözer ve bu tayf, belirli dalga boylarında ölçülerek elementlerin konsantrasyonu hesaplanır. Özellikle atom ve iyonların yaydığı ışığın yoğunluğu elementin numune içindeki miktarıyla doğru orantılıdır. Bu nedenle, ICP-OES cihazları iz element analizlerinde çok düşük seviyelerde bile doğru sonuçlar verebilir [Ammann, 2007].

Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Perkin Elmer Optima 2100 DV markalı ICP-OES cihazına yerleştirilen numunelerin analizi gerçekleştirildi. Analizde okunan değerler Tablo 3.11 ve 3.12’de gösterilmiştir.

Tablo 3.11: Anakart-1 numunesine ait ICP-OES analiz sonuçları.

ANAKART-1				
Numuneler ICP Analizi yapılan Metaller (mg/L)	İşlemci ve Pinler	Devre Elemanları	Anakart	Anakart Slot ve Soketleri
Bakır(Cu)	419,90	25,12	105,10	178,10
Kalay(Sn)	772,50	114,90	155,20	225,60
Çinko(Zn)	66,99	309,20	80,45	71,52
Titanyum(Ti)	92,56	40,12	3,29	5,03

Tablo 3.12: Anakart-2 numunesine ait ICP-OES analiz sonuçları.

ANAKART-2				
Numuneler ICP Analizi yapılan Metaller (mg/L)	İşlemci ve Pinler	Devre Elemanları	Anakart	Anakart Slot ve Soketleri
Bakır(Cu)	604,50	36,45	1982,00	89,74
Kalay(Sn)	867,60	58,13	203,90	490,80
Çinko(Zn)	106,60	77,09	1937,00	58,07
Titanyum(Ti)	39,24	16,40	9,09	4,15

Tablo 3.11 ve 3.12'deki veriler, iki farklı anakarttan hidrometalurjik yöntem ile çözünmesi sağlanan dört metalin (bakır, kalay, çinko ve titanyum) oranlarını göstermektedir. Veriler, işlemci ve pinler, devre elemanları, anakartın kendisi ve anakart slot ve soketleri gibi farklı bileşenlerden elde edilmiştir. İki farklı anakartın metal geri kazanım oranları kıyaslanarak şu şekilde yorumlanabilir:

- **Bakır (Cu):**

Anakart-1 numunesinde, işlemci ve pinler bakır açısından en zengin bileşendir ve 419,90 mg/L bakır çözünmektedir. Anakartın kendisinde ise 105,10 mg/L bakır bulunmuştur. Anakart-2 numunesinde, işlemci ve pinlerdeki bakır miktarı 604,50 mg/L ile daha yüksektir. Anakartta ise 1982,00 mg/L gibi oldukça yüksek bir bakır oranı

tespit edilmiştir. Genel olarak bakıldığında, Anakart-2 numunesinde bakır açısından daha fazla çözünme gerçekleşmiştir, özellikle anakart bileşeninde bakır çözünmesi dikkat çekici derecede fazladır.

- **Kalay (Sn):**

Anakart-1 numunesinde en fazla kalay, 772,50 mg/L olarak işlemci ve pinlerden geri kazanılmıştır. Devre elemanları 114,90 mg/L, anakart 155,20 mg/L ve anakart slot ve soketlerinden 225,60 mg/L kalay geri kazanılmıştır. Anakart-2 numunesinde ise işlemci ve pinlerde kalay miktarı 867,60 mg/L ile daha yüksektir. Anakart slot ve soketleri ise 490,80 mg/L ile diğer bileşenlere kıyasla önemli miktarda kalay çözünmektedir. Anakart-2 numunesinde kalay miktarları, özellikle anakart slotlarında ve pinlerde daha yüksek olduğu için kalay açısından Anakart-2 numunesinde daha fazla çözünme olmuştur.

- **Çinko (Zn):**

Anakart-1 numunesinde, çinko en fazla devre elemanlarında (309,20 mg/L) ve anakart (80,45 mg/L) bileşeninde bulunmuştur. Anakart-2 numunesinde, yine çinko en çok devre elemanlarında (77,09 mg/L) ve anakartta (1937,00 mg/L) yoğunlaşmıştır. Çinko miktarı açısından Anakart-1 numunesinde devre elemanlarında öne çıksa da, Anakart-2 numunesi genel olarak, özellikle anakart bileşeninde, daha fazla çinko çözünmektedir.

- **Titanyum (Ti):**

Anakart-1 numunesinde, işlemci ve pinler 92,56 mg/L titanyum içerirken, anakart slotları en düşük miktarda (5,03 mg/L) titanyum çözünmektedir. Anakart-2 numunesinde, titanyum miktarı her bileşende daha düşüktür. İşlemci ve pinler 39,24 mg/L, anakart ise yalnızca 9,09 mg/L titanyum çözünmektedir. Titanyum açısından her iki anakart da benzer şekilde düşük miktarlara sahiptir, ancak ilk anakart daha fazla titanyum geri kazanımı sağlamaktadır.

Genel olarak Bakır ve Kalay açısından Anakart-2 numunesinde, bakır ve kalay bakımından çok daha çözünme gerçekleşmiştir. Özellikle anakart ve slot bileşenlerinde yüksek oranlarda bu metaller geri kazanılmıştır.

Anakart-1 numunesinde devre elemanları açısından daha fazla çinko bulunmasına rağmen, ikinci anakartın anakart bileşeninde çok yüksek miktarda çinko çözünmesi, genel çinko kazancını artırmaktadır.

Anakart-1 numunesinde titanyum geri kazanımı açısından daha zengin olup, özellikle işlemci ve pinlerde daha fazla titanyum çözünmektedir.

Bu veriler göz önüne alındığında, Anakart-2 numunesinde özellikle bakır ve kalay geri kazanımı açısından çok daha değerli bir kaynak sunmaktadır. Anakart-1 numunesi ise çinko ve titanyum açısından bazı avantajlar sağlasa da genel olarak geri kazanılacak metallerin miktarı bakımından Anakart-2 numunesinde daha verimli bir geri dönüşüm sağlar.

Yapılan çalışmalar sonucundaki çözelti içerisindeki konsantrasyonu $C_{\text{gerçek}}$ Denklem (3.1)'deki eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$C_{\text{gerçek}}(\text{Cu,Ti,Zn,Sn}) = \frac{\text{Çözünen Metal Miktarı} \times \text{Kullanılan çözücü miktarı}}{\text{Reaksiyona alınan Metal tozu miktarı}} \quad (3.1)$$

3.7.2. Anakart-1 Numunelerinin Miktar Hesabı

Anakart -1 Bakır Verim Hesabı

$$C_{\text{gerçek}}(\text{Cu}) = \frac{419,9 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{0,999 \text{ gr}} = 42,03 \text{ mg/g} = 42,03 \text{ g/kg}$$

Numune-2 Bakır Hesabı

$$C_{\text{gerçek}}(\text{Cu}) = \frac{25,12 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,000 \text{ gr}} = 2,51 \text{ mg/g} = 2,51 \text{ g/kg}$$

Numune-3 Bakır Hesabı

$$C_{\text{gerçek}}(\text{Cu}) = \frac{105,1 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,000 \text{ gr}} = 10,50 \text{ mg/g} = 10,50 \text{ g/kg}$$

Numune-4 Bakır Hesabı

$$C_{\text{gerçek}}(\text{Cu}) = \frac{178,1 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,000 \text{ gr}} = 17,81 \text{ mg/g} = 17,81 \text{ g/kg}$$

Anakart -1 Kalay Verim Hesabı

Numune-1 Kalay Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Sn)}} = \frac{772,5 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{0,999 \text{ gr}} = 77,32 \text{ mg/g} = 77,32 \text{ g/kg}$$

Numune-2 Kalay Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Sn)}} = \frac{114,9 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,000 \text{ gr}} = 11,50 \text{ mg/g} = 11,50 \text{ g/kg}$$

Numune-3 Kalay Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Sn)}} = \frac{155,2 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,001 \text{ gr}} = 15,50 \text{ mg/g} = 15,50 \text{ g/kg}$$

Numune-4 Kalay Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Sn)}} = \frac{225,6 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,000 \text{ gr}} = 22,56 \text{ mg/g} = 22,56 \text{ g/kg}$$

Anakart -1 Çinko Verim Hesabı

Numune-1 Çinko Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Zn)}} = \frac{66,99 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{0,999 \text{ gr}} = 7,00 \text{ mg/g} = 7,00 \text{ g/kg}$$

Numune-2 Çinko Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Zn)}} = \frac{309,2 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,000 \text{ gr}} = 30,92 \text{ mg/g} = 30,92 \text{ g/kg}$$

Numune-3 Çinko Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Zn)}} = \frac{80,45 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,000 \text{ gr}} = 8,04 \text{ mg/g} = 8,04 \text{ g/kg}$$

Numune-4 Çinko Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Zn)}} = \frac{71,52 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,000 \text{ gr}} = 7,15 \text{ mg/g} = 7,15 \text{ g/kg}$$

Anakart -1 Titanyum Verim Hesabı

Numune-1 Titanyum Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Ti)}} = \frac{92,56 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{0,999 \text{ gr}} = 9,27 \text{ mg/g} = 9,27 \text{ g/kg}$$

Numune-2 Titanyum Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Ti)}} = \frac{401,2 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,000 \text{ gr}} = 4,01 \text{ mg/g} = 4,01 \text{ g/kg}$$

Numune-3 Titanyum Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Ti)}} = \frac{3,29 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,001 \text{ gr}} = 0,33 \text{ mg/g} = 0,33 \text{ g/kg}$$

Numune-4 Titanyum Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Ti)}} = \frac{5,03 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,000 \text{ gr}} = 0,50 \text{ mg/g} = 0,50 \text{ g/kg}$$

3.7.3. Anakart-2 Numunesi Verim Hesabı

Anakart -2 Bakır Verim Hesabı

Numune-1 Bakır Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Cu)}} = \frac{604,5 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{0,999 \text{ gr}} = 60,50 \text{ mg/g} = 60,50 \text{ g/kg}$$

Numune-2 Bakır Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Cu)}} = \frac{36,45 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,006 \text{ gr}} = 3,62 \text{ mg/g} = 3,62 \text{ g/kg}$$

Numune-3 Bakır Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Cu)}} = \frac{1982 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,010 \text{ gr}} = 196,20 \text{ mg/g} = 196,20 \text{ g/kg}$$

Numune-4 Bakır Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Cu)}} = \frac{89,74 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,001 \text{ gr}} = 8,97 \text{ mg/g} = 8,97 \text{ g/kg}$$

Anakart -2 Kalay Verim Hesabı

Numune-1 Kalay Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Sn)}} = \frac{867,6 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{0,999 \text{ gr}} = 86,85 \text{ mg/g} = 86,85 \text{ g/kg}$$

Numune-2 Kalay Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Sn)}} = \frac{58,13 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,006 \text{ gr}} = 5,78 \text{ mg/g} = 5,78 \text{ g/kg}$$

Numune-3 Kalay Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Sn)}} = \frac{203,9 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,010 \text{ gr}} = 20,18 \text{ mg/g} = 20,18 \text{ g/kg}$$

Numune-4 Kalay Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Sn)}} = \frac{490,8 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,001 \text{ gr}} = 49,03 \text{ mg/g} = 49,03 \text{ g/kg}$$

Anakart -2 Çinko Verim Hesabı

Numune-1 Çinko Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Zn)}} = \frac{106,6 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{0,999 \text{ gr}} = 10,67 \text{ mg/g} = 10,67 \text{ g/kg}$$

Numune-2 Çinko Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Zn)}} = \frac{77,09 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,006 \text{ gr}} = 7,66 \text{ mg/g} = 7,66 \text{ g/kg}$$

Numune-3 Çinko Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Zn)}} = \frac{1937 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,010 \text{ gr}} = 191,78 \text{ mg/g} = 191,78 \text{ g/kg}$$

Numune-4 Çinko Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Zn)}} = \frac{58,07 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,001 \text{ gr}} = 5,80 \text{ mg/g} = 5,80 \text{ g/kg}$$

Anakart -2 Titanyum Verim Hesabı

Numune-1 Titanyum Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Ti)}} = \frac{39,24 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{0,999 \text{ gr}} = 3,92 \text{ mg/g} = 3,92 \text{ g/kg}$$

Numune-2 Titanyum Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Ti)}} = \frac{16,40 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,006 \text{ gr}} = 1,63 \text{ mg/g} = 1,63 \text{ g/kg}$$

Numune-3 Titanyum Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Ti)}} = \frac{9,09 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,010 \text{ gr}} = 0,90 \text{ mg/g} = 0,90 \text{ g/kg}$$

Numune-4 Titanyum Hesabı

$$C_{\text{gerçek(Ti)}} = \frac{4,15 \text{ mg/L} \times 0,1 \text{ L}}{1,001 \text{ gr}} = 0,41 \text{ mg/g} = 0,41 \text{ g/kg}$$

Tablo 3.13: Anakart numunelerinden geri kazanılan metal miktarları.

Numuneler Metaller (g/kg)	Anakart -1 Numuneleri				Anakart-2 Numuneleri			
	İşlemci ve Pinler	Devre Elemanı	Anakart	Anakart Soket ve Slotları	İşlemci ve Pinler	Devre Elemanı	Anakart	Anakart Soket ve Slotları
Bakır	42,03	2,51	10,50	17,81	60,50	3,62	196,20	8,97
Kalay	77,32	11,50	15,50	22,56	86,85	5,78	20,18	49,03
Çinko	7,00	30,92	8,04	7,15	10,67	7,66	191,78	5,80
Titanyum	9,27	4,01	0,33	0,50	3,92	1,63	0,90	0,41

Tablo 3.13'te sunulan bulgular, anakartlardan geri kazanılan metal miktarlarının çeşitliliği ve bu metallerin elektronik atıkların geri dönüşümündeki önemini vurgulamaktadır. Özellikle bakır, kalay, çinko ve titanyum gibi metallerin geri kazanımı üzerine yapılan incelemeler, elektronik atıkların daha verimli bir şekilde işlenebilmesi için çeşitli stratejik çıkarımlar ve öneriler geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu veriler ışığında hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik faydalar sağlamak amacıyla geri dönüşüm süreçlerinin daha etkin hale getirilmesi gerektiği sonucuna varılabilir.

Anakartlardan geri kazanılan metaller, bileşenlerin özelliklerine ve üretim malzemelerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Anakart-1 ve Anakart-2

numuneleri üzerinden yapılan incelemede, her iki anakartın da farklı metal miktarlarına sahip olduğu görülmektedir. Bu farklar, anakartların farklı üretim süreçlerinden geçmiş olabileceği veya farklı kullanım ömürlerine sahip olduğu varsayımını doğurabilir.

Tablo 3.13'te bulunan verilere göre Bakır, elektronik atıklardan geri kazanımı en kritik metallerden biridir. Hem elektrik iletkenliği yüksek hem de endüstriyel kullanım alanı geniş olduğu için geri kazanım süreçlerinde büyük ekonomik öneme sahiptir. Tablo 3.13'te görüldüğü üzere, Anakart-1 numunelerinden elde edilen bakır miktarı, özellikle işlemci ve pinler (42,03 g/kg) ve anakart (10,50 g/kg) bileşenlerinde öne çıkmaktadır. Bu değerler, Anakart-1'de bakırın özellikle işlemci bağlantılarında yoğun kullanıldığını göstermektedir. Ancak Anakart-2'de bakır geri kazanım miktarı çok daha yüksek seviyelerde seyretmektedir; özellikle anakartın kendisinde 196,20 g/kg gibi oldukça yüksek bir geri kazanım miktarı göze çarpmaktadır. Bu durum, Anakart-2'nin daha yoğun bakır kullanılan devre kartlarına sahip olabileceği şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca bu durum literatürdeki bulgularla da büyük ölçüde uyumludur. Li ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada baskılı devre kartlarından (BDK) glisin yardımıyla bakır geri kazanımı oranı %99'dan fazla olduğu buda yaklaşık 150-200 g/kg arasında olduğunu ve alkali glisin, liçin kinetiğinin hızlanmasına ve daha fazla katı içeriğini etkileşime girdiği belirtilmektedir [Li vd., 2022]. Bu miktarların farklılık göstermesinin Li ve arkadaşlarının çalışmasında metal tozlarının ilk olarak alkali glisin-amonyak liçiyile işleme sokulduktan sonra ferrik sülfirik asit liçine işlem yapmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca Li ve arkadaşlarının çalışmasında atık anakartın tamamını tek bir parça olarak ele aldığı ama bu çalışmada ise atık anakartın bileşenleri ayrı ayrı değerlendirmeye alındığı için bazı bileşenlerde yüksek miktarlar bazı bileşenlerde daha düşük miktarların geri kazanıldığı tespit edildi. Bir başka çalışmada ise Meng ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda tv atık baskılı devre kartlarından süper yerçekimi ayırma yöntemi kullanılarak %93'lük bakır geri kazanımı gerçekleştirmiştir. Bu da yaklaşık olarak 480-520 g/kg arasında olduğunu belirtmiştir [Meng vd., 2018]. Çeşitli kaynaklar, bakırın BDK'lerden geri kazanımında %90'ın üzerinde verimlilik sağlandığını ve bu sürecin ekonomik açıdan da büyük bir potansiyel taşıdığını belirtmektedir. Bu çalışma, hidrometalurjik yöntemlerle yapılan bakır geri kazanımının etkinliğini vurgulamaktadır.

Bu bulgular, bakırın geri kazanım süreçlerinde önemli bir rol oynadığını ve geri kazanımın özellikle anakartlarda stratejik bir odak noktası olması gerektiğini göstermektedir. Daha verimli geri kazanım için, anakart üretim süreçlerinde bakırın hangi bileşenlerde kullanıldığına dair daha detaylı bir inceleme yapılmalı ve geri dönüşüm proseslerinde bu bileşenler hedef alınmalıdır. Örneğin, işlemci pinlerinden ve anakarttan bakırın geri kazanımı için özel proseslerin uygulanması verimliliği artırabilir.

Kalay, özellikle elektronik devrelerde kullanılan lehimleme malzemesi olarak büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca elektronik atıklarda geri kazanımı zor olan metallerden biridir. Tablo 3.14'te gösterilen kalay miktarları, en fazla işlemci pinlerinde 86,85 g/kg en düşük ise 5,78 g/kg devre elemanlarından geri kazanıldığı belirtilmiştir. Bu farklılığın temel sebebi lehimleme işlemlerinin ve kalay miktarının işlemci pinlerinde daha fazla bulunmasından kaynaklanmaktadır. Kalay geri kazanımı için Dimitrios Vlasopoulos ve arkadaşları tarafından yapılan iki aşamalı HCl ve HCl - H₂O₂ uygulamalarıyla yapmış olduğu çalışmalarda kalay geri kazanımının 80-100 g/kg aralığında olduğu bununda yaklaşık % 90 civarında olduğu belirtilmiştir [Vlasopoulos, 2008]. Yapılan bir başka çalışmada ise kalay geri kazanımında kullanılan hidrometalurjik yöntemlerin, BDK'lerdeki metal bileşimlerini ayırtırmada etkili olduğu gösterilmiştir [Birloaga vd., 2016]. Ek olarak Meng ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda tv atık baskılı devre kartlarından süper yerçekimi ayırma yöntemi kullanılarak kalay geri kazanımı 30 - 70 g/kg arasında olduğunu belirtmiştir [Meng vd., 2018]. Bu çalışmada, elde edilen veriler, geri kazanım sürecinizin literatürde bildirilen aralıklara yakın olduğunu göstermektedir. Bazı farklılıkların sebebi, Vlasopoulos'un yaptığı çalışmalarda kullanılmış olan yöntem ve yıkama sayısının farklı olması, Meng ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmalarda ise kullanılan baskılı devre kartı, televizyon kaynaklı bir baskılı devre kartı olması, geri kazanımı gerçekleştirilen metal miktarında farklılık göstermektedir.

Kalay lehimlerinin geri kazanımı sırasında yüksek verimlilik sağlayacak yeni teknolojiler geliştirilmesi, elektronik atıklardan elde edilen kalay miktarını artırabilir. Özellikle soket ve slotlar gibi kalay bakımından zengin bileşenlerin daha verimli işlenmesi, ekonomik açıdan değerli sonuçlar doğuracaktır.

Çinko, hem metalürji hem de kimya endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahip bir metaldir. Elektronik cihazlarda ise genellikle devre kartları ve kaplama işlemlerinde

kullanılır. Meng ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda tv atık baskılı devre kartlarından süper yerçekimi ayırma yöntemi kullanılarak çinko geri kazanımı 30 - 35 g/kg arasında olduğunu belirtmiştir [Meng et al. 2018]. Başka bir çalışmada ise kolon biyoliç düzeyinde orta derecede termofilik bakterilerin karışık uyarlanmış konsorsiyumu kullanılarak mikrobiyal liç ile %80 oranında yani yaklaşık 100 - 110 g/kg çinkonun geri kazanılabileceği rapor edilmiştir. [İlyas et al. 2010]. Tablo 3.14'teki geri kazanımı yapılan veriler, Anakart-1'de devre elemanlarından (30,92 g/kg) ve anakarttan (8,04 g/kg) önemli miktarda çinko geri kazanıldığını göstermektedir. Ancak Anakart-2'de çinko geri kazanımı çok daha dikkat çekicidir; anakart bileşeninden 191,78 g/kg çinko geri kazanılmıştır. Bu oldukça yüksek bir değerdir ve Anakart-2'nin üretiminde çinkonun yoğun kullanıldığını göstermektedir. Çinko geri kazanım süreçleri, özellikle anakartlardan çinko kaplamaların ayrıştırılmasıyla daha verimli hale getirilebilir. Anakart-2'de görülen yüksek çinko miktarı, bu numunenin çinko bazlı kaplamalarla donatılmış olabileceğine işaret etmektedir.

Tabloda 3.14'te yer alan verilere göre, titanyum en düşük miktarlarda geri kazanılan metal olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, titanyumun e-atıklarda bulunma oranının düşük olması ve geri kazanımının zorluklarıyla ilişkilidir. Anakart-1 numunelerinde işlemci ve pinler (9,27 g/kg) en yüksek titanyum içeriğine sahip bileşenlerdir. Anakart-2'de ise bu miktar oldukça düşüktür. Genel olarak EEE'lerde titanyum kullanımı sınırlıdır. Titanyum, genellikle yüksek dayanıklılık ve korozyon direnci gerektiren bileşenlerde kullanıldığından, anakartlarda kullanımının düşük olması şaşırtıcı değildir. Ancak Titanyumun dayanıklılığı ve hafifliği, özellikle havacılık, savunma ve ileri teknoloji ürünlerinde kullanımını artırabilir. Dolayısıyla, titanyumun geri kazanımı için yeni yöntemler geliştirmek, ilerleyen dönemlerde daha değerli hale gelebilir. Titanyumun geri kazanım süreçleri, diğer metallere kıyasla daha karmaşık ve maliyetlidir. Ancak, çevre dostu üretim süreçlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte titanyumun kullanımı artabilir. Geri dönüşüm stratejileri kapsamında, titanyum içeren bileşenlerin geri kazanımına yönelik daha spesifik proseslerin geliştirilmesi faydalı olabilir. Özellikle ileri teknoloji ürünlerde titanyum kullanımı arttıkça, bu metalin geri dönüşümündeki etkinliğin artırılması gerekecektir.

Elektronik atıklardan geri kazanılan metaller, doğal kaynakların tükenmesini önlemenin yanı sıra, ekonomik kazançlar da sağlar. Bakır, kalay, çinko ve titanyum

gibi metaller, yeniden işlenerek sanayiye kazandırıldığında, hammadde ihtiyacını azaltarak maliyetleri düşürür. Aynı zamanda, bu metallerin doğal yollarla elde edilmesi sırasında oluşan çevresel tahribatın önüne geçilir. Bu nedenle, geri dönüşüm süreçlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesi, hem çevre koruma hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olur hem de ekonomik faydalar sağlar. Geri kazanılan metallerin üretim döngüsüne yeniden kazandırılması, sürdürülebilir üretim modellerini destekleyerek gelecekteki kaynak kıtlıklarının önüne geçebilir.

Metal tozlarının XRF sonuçlarında en fazla bulunan elementler Silisyum ve kalsiyum olduğu görülmektedir. Silisyum ve kalsiyumun çözünmesi asit liçinde oldukça zordur. Metal tozu numuneleri liçinde kaba filtrede kalan elementler, çoğunlukla silisyum ve kalsiyum elementleridir. Silisyum ve kalsiyumun geri kazanım süreçlerinde artık ürün olarak kalması, çevre açısından herhangi bir zararlı etki oluşturmaz [Cui ve Zhang 2008]. Silisyum, doğada çok yaygın bulunan ve kimyasal olarak oldukça inert bir element olup, çevreye salındığında su, toprak veya hava ile tehlikeli reaksiyonlar oluşturmaz. Silisyum genellikle kayalarda ve kumda bulunduğu için, doğal süreçlerle uyumlu bir şekilde çevrede var olabilir. Benzer şekilde, kalsiyum da çözünmeyen bileşikler oluşturarak doğada zararlı etki göstermez. Kalsiyum karbonat gibi formları, toprak düzenleyici olarak işlev görür ve birçok bitki için gerekli bir elementtir. Ayrıca, bu iki element biyolojik birikime uğramadıkları için ekosistemlerde veya gıda zincirinde yoğunlaşarak zarar verme potansiyeline sahip değildir. Çevreye bırakıldıklarında ağır metaller veya toksik kimyasallar gibi bir tehdit oluşturmamaları için, silisyum ve kalsiyumun geri kazanım sonrası atık olarak kalması çevresel risk taşımaz ve çevre dostu bir işlem olarak kabul edilebilir. Bu nedenle, bu elementlerin geri kazanım sürecinden sonra kalan miktarları, çevreye zarar vermeden doğaya salınabilir.

3.8. Maliyet Analizi

Bu tez çalışmasında kullanılan atık baskı devre kartları ücretsiz olarak temin edilmiştir. Fakat bir maliyet analizi yapmak Türkiye'deki atık baskılı devre kartlarının kilogram fiyatı araştırılmıştır. ABDK'ler türlerine göre farklılık göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan ABDK'lerin kilogram fiyatı 28 TL olarak alınmıştır [Web9, 2024]. Anakartların ağırlıkları 900 ve 950 gramdır. Anakart-1 numunesinin maliyeti 25,20 TL olarak, Anakart-2 numunesinin maliyeti ise 26,60 TL olarak hesaplanmıştır. Toplam

Enerji gideri olarak ise atık baskılı devre kartlarına uygulanan ısıtma işlemi uygulanan numuneler için propan ve butan karışımı gaz kullanılmıştır. İki anakarta aynı anda 80-90 dakika uygulanan ısıtma işlemi için yaklaşık 200 gram gaz karışımı tüketilmiştir. 2024 yılı itibarıyla, 1 kilogramlık gazın fiyatı 100-150 TL arasında değişmektedir [Web10, 2024]. Fiyat ortalama olarak 120 TL olarak alınmıştır. 200 gram gazın maliyeti ise 24 TL olarak hesaplanmıştır. Bu işlemler iki anakarta aynı anda uygulandığı için anakart başına 12 TL enerji gideri olarak maliyet çıkartılmıştır.

Deneylerde her bir numune için 25 mL sülfirik asit ve 75 mL saf su kullanılmıştır. Her anakart için 4 numune, toplamda 8 adet numunede kimyasal reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Yani her anakart için 100 mL sülfirik asit ve 300 mL saf su kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kimyasalların maliyetleri Tablo 3.14'te gösterilmiştir. Anakart başına geri kazanımı gerçekleştiren metal ortalamaları Tablo 3.15'de gösterilmiştir.

Tablo 3.14: Kullanılan kimyasalların maliyetleri.

Kimyasallar	Marka	Litre (TL)	FiyatıAnakart Başına Kullanılan Kimyasal Fiyatı (TL)
Sülfirik asit	%97, APEKS	20,00	2,00
Saf su	Stabilize, TEKKİM	12,00	3,60

Tablo 3.15: Anakart başına geri kazanımı gerçekleştirilen metal ortalamaları.

Numuneler	Anakart - 1	Anakart - 2
Metaller (g/kg)	Ağırlık Ortalaması	Ağırlık Ortalaması
Bakır	18,22	67,33
Kalay	31,72	40,46
Çinko	13,28	54,00
Titanyum	3,53	1,72

Londra Metal Endüstri'sinden (LME) alınan verilere göre, elektronik atıklardan geri kazanılması hedeflenen metallerin fiyatları analiz edilmiştir. Bu fiyatlar, bakır, kalay, çinko ve titanyum gibi metaller için belirlenmiş olup, 26 Eylül 2024 tarihli metal

fiyatları [Web11, 2024] ve Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası'ndan (TCMB) alınan döviz kuru verilerine [Web12, 2024] dayanarak, metal fiyatlarının Türk lirası karşılıkları Tablo 3.16'da gösterilmiştir.

Tablo 3.16: LME metal fiyatları ve TCMB verileri.

Metaller	Metallerin Kg Fiyatı (\$)¹	Metallerin Kg Fiyatı (TL)
Bakır	9,99	341,26
Kalay	32,50	1110,20
Çinko	3,07	104,90
Titanyum	44,00	1503,00

3.8.1. Anakart -1 Numunesinin Maliyet Verimliliği Hesaplaması

Anakart-1 numunesine ait deneylerin gerçekleştirilebilmesi için çeşitli aşamalardan geçilmiştir. Bu aşamaların her biri, farklı maliyetler gerektirmiştir. Tüm işlemler için yapılan harcamalar, olarak Tablo 3.17'de sunulmuştur.

Tablo 3.17: Anakart-1 numunesine ait maliyet giderleri.

Gider Kalemleri	Maliyet Ücretleri (TL)
Atık Anakart	25,20
Enerji Maliyeti	12,00
Kimyasallar	5,60
Toplam	42,80

- **Bakır (Cu):** 18,22 kg / 1000 * 341,26 TL/kg = 6,22 TL
- **Kalay (Sn):** 31,72 kg / 1000 * 1.110,20 TL/kg = 35,22 TL
- **Çinko (Zn):** 13,28 kg / 1000 * 104,90 TL/kg= 1,39 TL
- **Titanyum (Ti):** 3,53 kg / 1000 * 1.503,00 TL/kg = 5,30 TL

Toplam Anakart-1 değeri = 6,22 + 35,23 + 1,39 + 5,29 = 48,13 TL

Anakart ağırlığı 900 gram olduğu için hesaplanan sonuç 900 grama göre 43,32 TL olarak hesaplanmıştır.

¹ Veriler 26 Eylül 2024 tarihinde alınmıştır.

3.8.2. Anakart -2 Numunesinin Maliyet Verimliliği Hesaplaması

Anakart-2 numunesine içinde yapılan deneylerin gerçekleştirilebilmesi için çeşitli aşamalardan geçilmiştir. Bu aşamaların her biri, farklı maliyetler gerektirmiştir. Tüm işlemler için yapılan harcamalar, olarak Tablo 3.18'de sunulmuştur.

Tablo 3.18: Anakart-2 numunesine ait maliyet giderleri.

Gider Kalemleri	Maliyet Ücretleri (TL)
Atık Anakart	26,60
Enerji Maliyeti	12,00
Kimyasallar	5,60
Toplam	44,20

- **Bakır (Cu):** $67,33 \text{ kg} / 1000 * 341,26 \text{ TL/kg} = 22,98 \text{ TL}$
- **Kalay (Sn):** $40,46 \text{ kg} / 1000 * 1.110,20 \text{ TL/kg} = 44,92 \text{ TL}$
- **Çinko (Zn):** $54,00 \text{ kg} / 1000 * 104,90 \text{ TL/kg} = 5,66 \text{ TL}$
- **Titanyum (Ti):** $1,72 \text{ kg} / 1000 * 1.503,00 \text{ TL/kg} = 2,58 \text{ TL}$

Toplam Anakart-2 değeri = $22,98 + 44,92 + 5,66 + 2,58 = 76,14 \text{ TL}$

Anakart ağırlığı 950 gram olduğu için hesaplanan sonuç 950 grama göre 72,33 TL olarak hesaplanmıştır.

Atık anakartlar için yapılan maliyet analizinde Anakart-1 numunesinin kar oranı %1,22 olarak hesaplanırken, Anakart -2 numunesi için %63,64 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma laboratuvar ölçekli olmasına rağmen karlı bir işlem olmuştur. Bu çalışmalarda bakır, kalay, çinko ve titanyum gibi kıymetli metallere yoğunlaşmıştır. Ancak anakartlarda mevcut olan diğer değerli metaller (örneğin altın, gümüş, paladyum alüminyum gibi) hesaba katılmamıştır. Eğer bu metaller de hesaba dahil edilseydi, kar oranlarının daha da artacağı açıkça görülmektedir. Ayrıca, büyük ölçekli ticari geri dönüşüm uygulamalarında daha verimli süreçler kullanılarak, hem metal geri kazanımı artırılabilir hem de işlem maliyetleri düşürülebilir. Dolayısıyla bu çalışmanın küçük ölçekte dahi karlı olması, endüstriyel uygulamalar için umut verici sonuçlar doğurabilir.

Özetle, laboratuvar ortamında yapılan bu çalışma, atık baskılı devre kartlarından geri kazanımın ekonomik açıdan sürdürülebilir ve karlı olabileceğini göstermektedir.

Büyük ölçekli işlemlerle, geri kazanım sürecindeki verimlilik artırılarak çok daha yüksek kar oranları elde edilebilir.



4.SONUÇLAR

Bu çalışmada, bir atık baskılı devre kartı olan bilgisayar anakartının bütün bileşimlerinin metalik bileşenlerin geri kazanımı, oksidan olarak kullanılarak sülfürik asit liçi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Metal ekstraksiyonu üzerinde durulan en önemli amaç bir anakartın tüm bileşenlerinin geri kazanım için uygun olup olmadığını incelemek üzerinde barındırdığı metal bileşenleri gözlemlemek ve hidrometalurjik yöntem ile geri kazanımı amaçlamıştır. Bu çalışma, elektronik atıkların geri dönüştürülmesi sürecinde ABDK'den bakır, çinko, titanyum ve kalay gibi metallerin verimli bir şekilde geri kazanılabileceğini göstermektedir. Özellikle bakır, ABDK'ların en değerli metalik bileşenlerinden biri olup, geri dönüşümü ekonomik ve çevresel açıdan büyük bir öneme sahiptir. Çalışmada iki farklı anakart numunesi incelenmiş ve bu numunelerdeki metallerin hidrometalurjik yöntemlerle geri kazanımı üzerine hesaplamalar yapılmıştır. Geri kazanım süreci sülfürik asit liçi yöntemiyle gerçekleştirilmiş, 1 gram numuneye 25 mL sülfürik asit ve 75 mL saf su uygulanmıştır.

XRF analizleri ile anakartların metal içeriği tespit edilmiş, bakırın yanı sıra çinko, kalay ve titanyum gibi metallerin de geri kazanımı incelenmiştir. Yapılan analizler, Anakart-1 ve Anakart-2 numuneleri arasında metal geri kazanımı açısından farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle Anakart-2'nin bakır ve çinko geri kazanımı açısından daha zengin bir kaynak olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, bakır geri kazanımı için kg başına 196,2 gramlık bir verim elde edilmiş, çinkoda ise 191,78 g/kg gibi yüksek bir geri kazanım sağlanmıştır. Ayrıca, kalay ve titanyum gibi metallerin geri kazanımı için yapılan hesaplamalarda, titanyumda 9,27 g/kg'e kadar verim elde edilmiş, kalayda ise Anakart-1 numunesinde 77,32 g/kg, Anakart-2 numunesinde 86,85 g/kg gibi dikkat çekici bir geri kazanım verimi sağlanmıştır. Ayrıca yapılan maliyet analizinde Anakart-1 numunesinin kar oranı %1,22 iken Anakart -2 numunesi için %63,64 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, özellikle elektronik atıkların geri dönüşümü sürecinde metal kazanımının optimize edilebileceğini ve çevresel sürdürülebilirlik için bu geri dönüşüm yöntemlerinin daha yaygın hale getirilebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, hidrometalurjik yöntemlerin BDK'lar gibi elektronik atıkların geri dönüşümünde etkili bir çözüm sunduğunu ve optimize edilmiş parametrelerle yüksek metal geri kazanım oranlarına ulaşılabileceğini ve ekonomik olarak da karlı olabileceğini ortaya koymuştur. Bu süreçler, sadece kaynakların korunmasına yardımcı

olmakla kalmayıp, aynı zamanda elektronik atıkların çevresel etkilerini azaltmak için de önemli bir adım teşkil etmektedir. Elektronik atıkların artan miktarı göz önüne alındığında, bu tür geri dönüşüm yöntemlerinin uygulanması, hem ekonomik hem de ekolojik açıdan kritik bir öneme sahiptir.



KAYNAKLAR

Alwaidh A., Sharp M., French P., (2014). Laser processing of rigid and flexible pcbs. *Optics and Lasers in Engineering*, 109-113.

Ammann A. A., (2007). Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP MS): a versatile tool. *Journal of mass spectrometry*, 42(4), 419-427.

Asghari I. Mousavi S. M., Amiri F., Tavossoli S., (2013). Harcanan rafineri katalizörlerinin biyolojik olarak araştırılması: bir inceleme. *J. İnd. Müh. Kimya*, 1069–1081.

Baldé C., Forti V., Gray V., Kuehr R., Stegmann P., (2017). The global e-waste monitor–2017, united nations university (unu), international telecommunication union (itu) & international solid waste association (iswa), bonn/geneva/vienna. *ISBN Electronic Version*, 978-992.

Birloaga I., Coman V., Kopacek B., Vegliò F., (2014). An advanced study on the hydrometallurgical processing of waste computer printed circuit boards to extract their valuable content of metals. *Waste Management*, 34, 2581–2586.

Broeksma C. P., Dorfling C., (2023). Evaluating glycine as an alternative lixiviant for copper recovery from waste printed circuit boards. *Waste Management*, 163, 96–107.

Castro F. D., Bassin J. P., (2022). Electronic waste: Environmental risks and opportunities. *Hazardous Waste Management: An Overview of Advanced and Cost-Effective Solutions*, 421–458.

Choubey S., Goswami P., Gautam S., (2021). Recovery of copper from Waste PCB boards using electrolysis. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2656–2659.

Cui J., Zhang L., (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2-3), 228-256.

Çiftlik S., Handırı İ., Beyhan M., Akçıl A. U., Ilgar M., Gönüllü, M. T., (2009). Elektrikli ve Elektronik Atıkların (E-Atık) Yönetimi. *Ekonomisi ve Metal Geri Kazanım Potansiyeli Bakımından Değerlendirilme*, (43).

Çömlekçi M., Tüzel S., (2005). PC Donanımı Herkes İçin, *Alfa Basım Yayım Dağıtım*.

Directive 1, (2002a), 2002/96/ec of the european parliament and of the council Of 27 January 2003 On Waste Electrical And Electronic Equipment (WEEE).

Directive 2, (2002b), 2002/96/ec of the european parliament and of the council Of 27 January 2003 On Waste Electrical And Electronic Equipment (WEEE).

Directive 3, (2011), 2011/65/eu of the european parliament and of the council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (recast) (Text with EEA relevance).

Directive 4, (2012), 2012/19/eu of the european parliament and of the council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast) (Text with EEA relevance).

Duan C., Han J., Zhao S., Gao Z., Qiao J., Yan G., (2018). The stripping effect of using high voltage electrical pulses breakage for waste printed circuit boards. *Waste Management*, 77, 603–610.

Ghosh B., Ghosh M., Parhi P., Mukherjee P., Mishra B., (2015). Waste printed circuit boards recycling: An extensive assessment of current status. *Journal of Cleaner Production*, 5-15.

Goosey M., Kellner R., (2003). Recycling technologies for the treatment of end of life printed circuit boards (PCBs). *Circuit World*, 29(3), 33–37.

Gupta A., Yan D. S., (2016). Mineral Processing Design and Operations. An Introduction. *Elsevier*, 71-73

Habashi F., (2005). A short history of hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 79(1–2), 15–22.

Huang K., Guo J., Xu Z., (2009). Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China. *In Journal of Hazardous Materials*, 164(2–3), 399–408.

Ilyas S., Ruan C., Bhatti H.N., Ghauri M.A., Anwar M.A., 2010. Column bioleaching of metals from electronic scrap. *Hydrometallurgy* 101 (3–4), 135–140.

Jafari M., Abdollahi H., Shafaei S.Z., Gharabaghi M., Jafari H., Akcil, A., Panda, S., (2019). Acidophilic bioleaching: A Review on the Process and Effect of Organic–inorganic Reagents and Materials on its Efficiency. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 40(2), 87-107.

Jha M. K., Lee J. C., Kim M. S., Jeong J., Kim B. S., Kumar V., (2013). Hydrometallurgical recovery/recycling of platinum by the leaching of spent catalysts: A review. *Hydrometallurgy*, 133, 23–32.

Johnson D.B., Du Plessis C.A., (2015). Biomining in reverse gear: Using bacteria to metals from oxidised ores. *Minerals Engineering*, 75, 2–5.

Kaya M., (2016). Recovery of Metals from Electronic Waste by Physical and Chemical Recycling Processes, 64-90.

Li H., Oraby E. A., Eksteen J. J., (2022). Development of an integrated glycine-based process for base and precious metals recovery from waste printed circuit boards. *Resources, Conservation and Recycling*, 187.

Li J., Zeng X., (2012). Recycling printed circuit boards. *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook*, 290–311.

Li Y., Richardson J. B., Walker A. K., Yuan P. C., (2006). TCLP Heavy Metal Leaching of Personal Computer Components. *Journal of Environmental Engineering*, 132(4), 497-504.

Mahesh P., (2007). E-Atık:WEEE Diğer Taraf Dijital Devrimin Tanımı, 6, 6.

McPherson D. T., (2005). Masaüstü bilgisayarlardan kaynaklanan e-atıkların tehlike değerlendirmesi, 152.

Meng L., Zhong Y., Guo L., Wang,Z., Chen K., Guo Z., (2018). Recovery of Cu and Zn from waste printed circuit boards using super-gravity separation. *Waste management*, 78, 559-565.

Okutan A., (2019). Tokyo Olimpiyatları, <https://Bilimgenc.Tubitak.Gov.Tr/Makale/2020-Tokyo-Yaz-Olimpiyatlari-Madalyalari-Geri-Donusumlu-Elektrikli-AletlerdenYapilacak>. ErişimTarihi: 15.05.2022.

Ongondo F. O., Williams I. D., Cherrett T. J., (2011). How Are WEEE Doing? A Global Review of the Management of Electrical and Electronic Wastes. *Waste Management*, 714–730.

Önel H., (2018), <https://haliccevre.com/wp-content/uploads/2018/12/atik-elektrikliveelektronik.pdf>. Erişim Tarihi : 15.05.2022

Pant D., Joshi D., Upreti M. K., Kotnala R. K., (2012). Chemical and biological extraction of metals present in E waste: A hybrid technology. *Waste Management*, 32(5), 979–990.

Pekdemir D. (2020). MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni 29, 49-62

Potysz, Kierczak. (2019). Prospective (Bio)leaching of Historical Copper Slags as an Alternative to Their Disposal. *Minerals*, 9, 9-10.

Priya A., Hait S., (2017). Comparative assessment of metallurgical recovery of metals from electronic waste with special emphasis on bioleaching. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(8), 6989–7008.

ResGaz 1, (2012), Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği 26 Aralık 2022 tarih ve 28300 sayılı Resmi Gazete.

Santoso S., Zagloel,T. Y. M., Ardi R., Suzianti A., (2019). Estimating the Amount of Electronic Waste Generated in Indonesia: Population Balance Model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 219(1).

Szalóki I., Osán J., Van G, R. E., (2006). X-ray spectrometry. *Analytical chemistry*, 78(12), 4069-4096.

Tuncuk A., Stazi V., Akcil A., Yazici E. Y., Deveci H., (2012). Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*, 25(1), 28–37.

Veit H. M., Bernardes A. M., (2015). *Electronic Waste Recycling Techniques*. Springer International Publishing, 28–30.

Wang J., Chen S., Zeng X., Huang J., Liang Q., Shu J., Chen M., Xiao Z., Zhao H., Sun Z., (2021). Recovery of high purity copper from waste printed circuit boards of mobile phones by slurry electrolysis with ammonia-ammonium system. *Separation and Purification Technology*, 275, 119180.

Web 1, (2022), Solving the e-waste problem. <https://www.step-initiative.org/>. (Erişim Tarihi: 02.01.2022).

Web 2, (2016), Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği Belediye Uygulama Rehberi, Bölgesel Çevre Merkezi, https://recturkey.files.wordpress.com/2016/11/AEEE_rehberi.pdf. (Erişim Tarihi : 10.03.2022).

Web 3, (2015), The Global E-Waste Monitor - 2014. URL: <https://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-small.pdf>. (Erişim Tarihi: 10.03.2022).

Web 4, (2024), WEEE FORUM. (2024). <https://Weee-Forum.Org/Iewd-about/#:~:Text=14%20October%202022%20%7C%20International%20E-Waste%20Day>. (Erişim Tarihi: 27.07.2024).

Web 5, (2011), Where are WEEE in Africa?, Secretariat of the Basel Convention. URL: <http://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW-EWASTE-PUB-WeeAfricaReport.English.pdf> (Erişim Tarihi : 10.03.2022).

Web 6, (2024), <https://Www.Tyk.Org.Tr/Tr/YetkilendirilmisKurulus/Detay/TUKETICILER/50/123/0>. (Erişim Tarihi 15.05.2024).

Web 7, (2016), <https://megepdersnotu.com/96/> (Erişim Tarihi:15.10.2023).

Web 8, (2014), [Report on critical raw materials for the EU - Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials](#). (Erişim tarihi: 15.06.2023).

Web 9, (2024), https://www.hurdacikapinda.com/hurda-fiyaatlari/#Hurda_Fiyaatlari. (Erişim Tarihi : 27.10.2024).

Web 10, (2024), <https://kurumsal.aygaz.com.tr/en/cylindergas/prices>. (Erişim Tarihi : 27.05.2024).

Web 11, (2024), https://www.tcmb.gov.tr/kurlar/kurlar_tr.html. (Erişim Tarihi : 27.10.2024).

Web 12, (2024), <https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous>. (Erişim Tarihi : 27.10.2024).

Wills B. A., Finch J. A., (2016). Will'in Cevher İşleme Teknolojisi: Cevher Arıtma ve Mineral Geri Kazanımının Pratik Yönlerine Giriş, 8, 25.

Wordsworth J., Khan N., Blackburn J., Camp J., Angelis-Dimakis A., (2021). Technoeconomic Assessment of Organic Halide Based Gold Recovery from Waste. *Electronic and Electrical Equipment. Resources*, 10(2), 17.

Xia M., Bao P., Liu A., Wang M., Shen L., Yu R., Liu Y., Chen M., Li J., Wu X., Qiu G., Zeng W., (2018). Bioleaching of low-grade waste printed circuit boards by mixed fungal culture and its community structure analysis. *Resources, Conservation & Recycling*, 136, 267–275.

Yazıcı E., Deveci H., Akcil A., (2009). Recovery from Recycling: E-Wastes, Recycling Industry, 26, 59-62.

Yazıcı E., Deveci A., (2011). Geleceğin Madenleri: E-atıklar (Mines of Future: E-waste). *2nd International Mining Congress and Exhibition of Turkey (IMCET)* , 441–448.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Nazım ÖZDEMİRCAN, 2013 yılında Batman Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi Elektrik ve Elektronik Bölümünden mezun oldu. 2014-2018 yılları arasında Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği bölümünde lisans öğrenimini tamamlamıştır. 2020 yılından itibaren Milli Savunma Bakanlığı 41. Bakım Fabrika Müdürlüğünde Çevre Mühendisi olarak görev yapmaktadır. 2021 yılında başladığı Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim dalından 2024 yılında mezun olarak yüksek lisans öğrenimini tamamlamıştır.



TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

Özdemircan M. N., Öncel M. S., (2024). Atık Baskılı Devre Kartlarının Değerli Metal Konsantrasyonlarının Belirlenmesi, Alternatif Geri Kazanım Önerileri.

