

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BASKILI DEVRE KARTLARINDAN KIYMETLİ METAL GERİ KAZANIMINDA  
ERGİTME ŞARTLARININ İNCELENMESİ**

**ÖZLEM ATASOY KOCATÜFEK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ÜRETİM PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. MUHLİS NEZİHİ SARİDEDE**

**İSTANBUL, 2012**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BASKILI DEVRE KARTLARINDAN KIYMETLİ METAL GERİ KAZANIMINDA  
ERGİTME ŞARTLARININ İNCELENMESİ**

Özlem ATASOY KOCATÜFEK tarafından hazırlanan tez çalışması ..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Muhlis NEZİHİ SARİDEDE  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Muhlis Nezihi SARİDEDE  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ahmet EKERİM  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Yrd. Doç. Dr. Burcu D. ÇORBACIOĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

## ÖNSÖZ

---

Yüksek lisans tezimin, tez konusunun seçimi ve hazırlanmasında değerli bilgi ve önerileriyle çalışmalarına yön veren saygıdeğer hocam Doç. Dr. Muhlis Nezih SARIDEDE'ye teşekkürlerimi arz ederim.

Tez ile ilgili çalışmalarım esnasında, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen başta Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Özcan HALAÇ olmak üzere tüm İstanbul Altın Rafinerisi A.Ş. laboratuvar ve üretim departmanları personeli ve özellikle Sayın Met. ve Mal. Mühendisi Cenk KOCATÜFEK'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Bugünlere gelmemi sağlayan sevgili aileme de sonsuz teşekkürler sunarım.

Haziran, 2012

Met. ve Mal. Mühendisi

Özlem ATASOY KOCATÜFEK

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	vii
KISALTMA LİSTESİ .....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xi
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT .....	xv
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ.....	1
1.1    Literatür Özeti .....	1
1.2    Tezin Amacı .....	1
1.3    Hipotez.....	1
<b>BÖLÜM 2</b>	
ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMAN ATIKLARINA GENEL BAKIŞ .....	2
2.1    Elektrikli ve Elektronik Atıklar .....	3
2.1.1    Elektrikli ve Elektronik Atık Kaynaklarının Sınıflandırılması.....	3
2.1.2    Elektrikli ve Elektronik Atıkların Materyal İçerikleri ve Kimyasal Bileşimi .....	4
2.1.3    Elektrikli ve Elektronik Atıkların Geri Kazanımları .....	8
2.1.4    Elektrikli ve Elektronik Atıklardaki Zararlı Bileşenler .....	10
2.2    Elektrikli ve Elektronik Atıklar İle İlgili Yasal Düzenlemeler .....	12
2.3    Türkiye ve Dünyadaki Elektronik Atık Durumu .....	14

## BÖLÜM 3

BASKILI DEVRE KARTLARI .....	18
------------------------------	----

3.1 Baskılı Devre Kartlarının Kimyasal Bileşimi ve Fiziksel Özellikleri .....	20
---	----

## BÖLÜM 4

BASKILI DEVRE KARTLARININ GERİ KAZANIM YÖNTEMLERİ.....	24
--	----

4.1 Ön İşlemler.....	27
----------------------	----

4.2 Mekanik ve Fiziksel Ön İşlemler.....	28
--	----

4.2.1 Kırma İşlemleri.....	29
----------------------------	----

4.2.2 Manyetik Ayırma İşlemleri.....	30
--------------------------------------	----

4.2.3 Yoğunluk Farkına Göre Ayırma İşlemleri .....	30
--	----

4.2.4 Elektrostatik Ayırma İşlemleri.....	31
---	----

4.3 Pirometalurjik Geri Kazanım Yöntemi.....	34
--	----

4.3.1 Geleneksel Yöntemler .....	34
----------------------------------	----

4.3.1.1 Bakır İle Geri Kazanım Yöntemi .....	34
--	----

4.3.1.2 Kurşun İle Geri Kazanım Yöntemi.....	37
--	----

4.3.2 Yeni Geliştirilen Yöntemler .....	39
---	----

4.3.2.1 Plazma Ark İle Ergitme Yöntemi .....	39
--	----

4.3.2.2 Piroliz .....	40
-----------------------	----

4.3.2.3 Üstten Üfleme Prosesi.....	43
------------------------------------	----

4.4 Hidrometalurjik Geri Kazanım Yöntemleri.....	43
--	----

4.5 Biyometalurjik Yöntemler .....	47
------------------------------------	----

## BÖLÜM 5

BASKILI DEVRELERİN ERGİTİLMESİ İLE İLGİLİ DENEYSEL ÇALIŞMA ÖRNEKLERİ .....	49
--	----

## BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	53
---------------------------	----

6.1 Deneylerde Kullanılan Hammadde ve Cihazlar.....	53
---	----

6.2 Deneylerin Yapılışı.....	56
------------------------------	----

## BÖLÜM 7

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME .....	60
--	----

7.1 %Kazanıma Kollektör Metal Kullanımının ve Miktarının Etkisi .....	60
---	----

7.2 Curuflaştırıcı Miktarının Etkisi.....	64
---	----

7.3 Curuflaştırıcı Bileşiminin Etkisi .....	71
---	----

## BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER .....	74
KAYNAKLAR .....	76
EK-A.....	82
A1    Deney Numuneleri Ağırlıkları, Kollektör metal, Curuflaştırıcı, Elde Edilen Metal ve Curuf Ağırlıkları .....	82
A2    Metal ve Curuf Fazlarının Elementel Analiz Sonuçları .....	84
A3    Metaldeki ve Cüruftaki Kıymetli Metal Oranları.....	86
A4    Kıymetli Metal % Kazanım Miktarları .....	87
ÖZGEÇMİŞ .....	88

## SİMGE LİSTESİ

---

$KM_m$  Metalik fazdaki kıymetli metal miktarı

$KM_c$  Curuf fazındaki kıymetli metal miktarı

## KISALTMA LİSTESİ

---

WEEE	Waste electrical and electronic equipment
AEEE	Atık elektrikli ve elektronik ekipman
PCB	Printed circuit board
CFC	Chlorofluorocarbon
PCB	Polychlorinated biphenyls
PVC	Polyvinyl chloride
EEE	Elektrikli ve elektronik ekipman
E-atık	Elektronik atık
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
PPDB	Polibromlu Dibenzodioksin
PBDF	Polibromlu Dibenzofuran
PBF	Polibromürlü Bifenil
PBDE	Polibromürlü Difenil Eter
BFR	Brominated Flame Retardants
RoHS	The Restriction of The Use of Certain Hazardous in Electrical and Electronic Equipment
PBB	Polibromlu bifenil
UNEP	BM Çevre Programı
FR	Flame retardant
THD	Through-hole Device
SMD	Surface mounted device
BMO	Base Metal Operations
PBDDS	Polibromlu dibenzo-p-dioxins
SX	Solvent ekstraksiyonu
IX	İyon değişimi
CIP	Carbon-in-pulp
CIL	Carbon-in-leach



## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Elektrikli ve elektronik atıkların ürüne göre dağılımı .....	4
Şekil 2.2	AEEE'lerde kullanılan alev geciktiricilerin % dağılım miktarları .....	7
Şekil 2.3	AEEE geri dönüşüm döngüsü .....	8
Şekil 2.4	AEEE'lerin geri kazanım işlemleri akış şeması .....	9
Şekil 2.5	Plastiklerin geri dönüşüm işlemleri akış diyagramı .....	10
Şekil 2.6	Atık durumdaki AEEE'lerin belirleyici sembolü .....	13
Şekil 2.7	AB ülkelerinde 2009 yılı itibariyle satılan toplana geri kazanılan AEEE miktarları .....	15
Şekil 2.8	2006-2011 yılları arasında Türkiye'de toplanan AEEE miktarı .....	16
Şekil 3.1	Çok katmanlı bir baskılı devrenin şematik çizimi .....	19
Şekil 3.2	Elektronik Atık Durumundaki Baskılı Devreler .....	19
Şekil 4.1	Baskılı devre kartlarının geri kazanım süreci şematik çizimi .....	26
Şekil 4.2	Demontaj işlemi sonrası PCB üzerinden çıkarılan parçalar ve nihai atık ürün .....	27
Şekil 4.3	Yarı-mekanik ayırma ünitesi şematik çizimi .....	28
Şekil 4.4	Mekanik ve fiziksel işlemler genel akış diyagramı .....	29
Şekil 4.5	Üstten beslemeli Eddy akımı ayırıcısı şematik çizimi .....	31
Şekil 4.6	Korona elektrostatik seperatörü şematik çizimi .....	32
Şekil 4.7	Umicore Rafinerisi metal rafinasyonu akış şeması .....	38
Şekil 4.8	Plazma ergitme işlemi akış diyagramı .....	40
Şekil 4.9	Laboratuvar ölçekli piroliz sisteminin şematik çizimi .....	42
Şekil 4.10	Kıymetli metallerin hidrometalurjik geri kazanım işlemleri örnek akış şeması .....	47

Şekil 6.1	Baskı devresi numunelerinden ayrılan zararlı komponentler ve deneylerde kullanılan numune tipi .....	54
Şekil 6.2	Deneyler sırasında kullanılan PCB numunelerinin boyutları .....	54
Şekil 6.3	Deneyler sırasında kullanılan bakır numuneler.....	55
Şekil 6.4	Deneyler sırasında kullanılan indüksiyon ocağı ve potalar .....	55
Şekil 6.5	Analizlerde kullanılan Spectro Genesis ICP-OES ve XRF analiz cihazları .....	56
Şekil 6.6	DeneySEL çalışmalara ait akış diyagramı .....	57
Şekil 7.1	1.tip curuflaştırıcı değişken bakır miktarında elde edilen %kazanım değerleri.....	60
Şekil 7.2	2.1 ve 2.2 Numune no'lu ergitme işlemleri sonucu elde edilen metalik fazlar.....	62
Şekil 7.3	Farklı tip curuflaştırıcıların kollektör metal ilaveli ve ilavesiz % kazanım değerleri .....	62
Şekil 7.4	Curuf içerisinde tespit edilen metalik granül şeklindeki parçalar.....	63
Şekil 7.5	CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> denge diyagramı 2.tip curuflaştırıcı bileşim noktası.....	64
Şekil 7.6	2.tip curuflaştırıcı miktarının %kazanıma etkisi .....	65
Şekil 7.7	3.tip curuflaştırıcı miktarının %kazanıma etkisi .....	66
Şekil 7.8	4.tip curuflaştırıcı miktarının %kazanıma etkisi .....	66
Şekil 7.9	4.tip curuflaştırıcı ile yapılan ergitme sonucu cüruf içerisindeki metalik granül fazlar .....	67
Şekil 7.10	5.tip değişken curuflaştırıcı miktarının %kazanıma etkisi.....	67
Şekil 7.11	Değişken curuflaştırıcı miktarı ve bileşenlerinin %kazanıma etkisi .....	68
Şekil 7.12	7.tip curuflaştırıcı miktarının %kazanıma etkisi .....	69
Şekil 7.13	Kollektör metal ilavesi ile 1.tip değişken curuflaştırıcı miktarının %kazanıma etkisi .....	69
Şekil 7.14	Kollektör metal ilaveli farklı tip curuflaştırıcıların değişik miktarlarının %kazanıma etkisi .....	70
Şekil 7.15	200g curuflaştırıcı kullanıldığında curuflaştırıcı bileşiminin %kazanıma etkisi .....	71
Şekil 7.16	300g curuflaştırıcı kullanıldığında curuflaştırıcı bileşiminin %kazanıma etkisi .....	72
Şekil 7.17	150g curuflaştırıcı kullanıldığında curuflaştırıcı bileşiminin %kazanıma etkisi .....	73

## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Baskılı devrelerde kullanılan elementlerin uygulama alanları .....	3
Çizelge 2.2	AEEE'lere ait materyal içerikleri .....	5
Çizelge 2.3	Çeşitli AEEE'lerin metal kompozisyonu .....	5
Çizelge 2.4	Kişisel bilgisayarların elementel analizi ve geri dönüşüm oranları .....	6
Çizelge 2.5	RoHS kapsamında sınırlandırılan materyaller .....	14
Çizelge 2.6	Yıllık bazda hedeflenen AEEE toplama miktarları .....	17
Çizelge 3.1	PCB kaynakları ve miktarları.....	18
Çizelge 3.2	Baskılı devre kartlarının materyal içerikleri.....	20
Çizelge 3.3	Baskılı devrelerde kullanılan elementlerin uygulama alanları .....	21
Çizelge 3.4	Baskılı devre kartların materyal içeriklerinin yoğunluk ve elektriksel iletkenlik ve manyetik duyarlılık özellikleri.....	22
Çizelge 3.5	Partikül şeklinin ayırma proseslerine etkisi.....	23
Çizelge 3.6	Baskılı devre kartları atıklarının serbestleşme dereceleri.....	23
Çizelge 4.1	Çeşitli metallerin geri dönüşüm işlemleri sonucunda enerji kazanımı ...	25
Çizelge 4.2	Ayrırmanın bir faktörü olarak demirdışı metallerin iletkenlik ve yoğunluk oranları.....	32
Çizelge 4.3	Elektrostatik ayırma yöntemleri.....	33
Çizelge 4.4	Geri kazanım yöntemlerinin kıyaslanması .....	48
Çizelge 5.1	Yanma işlemi sonrası materyal kompozisyonu .....	50
Çizelge 5.2	Ergitme sırasında kullanılan girdilerin ortalama kompozisyonları.....	51
Çizelge 5.3	Metal içeriklerinin giriş ve çıkış analizleri.....	52
Çizelge 6.1	Curuflaştırıcı tiplerine göre kullanılan bileşikler .....	56
Çizelge 7.1	Değişken bakır miktarlarında elde edilen %Kazanım değerleri .....	61
Çizelge 7.2	Kollektör metal ilaveli ergitme işlemleri sonucu elde edilen	

	%kazanım değerleri .....	62
Çizelge 7.3	XRF analizi sonucu cürufta bulunan miktarlar .....	63

---

**BASKILI DEVRE KARTLARINDAN KIYMETLİ METAL GERİ KAZANIMINDA  
ERGİTME ŞARTLARININ İNCELENMESİ**

Özlem ATASOY KOCATÜFEK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Muhlis Nezih SARİDEDE

Günümüz dünyasında, teknolojik gelişmelerden kaynaklanan en önemli problemlerden biri elektrik ve elektronik atıklarıdır (E-atık). E-atıklar içerdikleri ağır metaller, plastikler ve alev geciktiriciler nedeniyle çevre ve insan sağlığını tehdit etmektedir. E-atıklardan özellikle baskılı devre kartları (PCB), kıymetli metal içerikleri nedeniyle ekonomik bir değere sahiptirler. Bu nedenle, PCB'lerin geri kazanımı sadece zararlı etkilerinden değil, aynı zamanda kıymetli metal içerikleri nedeniyle de önemlidir. Geri kazanım işlemleri ile, pirometalurjik, hidrometalurjik, elektrometalurjik vb. yöntemler kullanılarak, e-atıkların içerisindeki kıymetli metaller elde edilebilmektedir. Endüstriyel olarak en yaygın kullanılan pirometalurjik yöntemlerde, e-atıklar çeşitli metal konsantreleri ve curuflaştırıcılar yüksek sıcaklıklarda ergitilmektedirler. Ergitme işlemleri sonucunda, kıymetli metaller oluşan metalik faza toplanmakta ve daha sonra uygulanan işlemler ile ayrılmaktadır.

Tez çalışmasında, pirometalurjik yöntem kullanılarak, atık bilgisayarlara ait baskılı devre kartlarındaki kıymetli metallerin geri kazanımı sırasında toplayıcı metal kullanımı ve miktarı ile, curuflaştırıcı bileşimi ve miktarının etkisini incelenmiştir.

Atık durumdaki PCB'ler öncelikle el ile demontaj işlemine tabi tutulmuşlardır. Ardından 2,5cm-2,5cm boyutlarında kesilmiş ve 850-950°C arasında yakılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında, yakma işlemi sonrası kıymetli metal içeren kısımlar, farklı çeşitte ve miktarda curuflaştırıcı ilavesi ve toplayıcı metal olarak kullanılan bakır varlığında/yokluğunda 1250-1350°C arasında ergitilmiştir.

Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre, prosese giren kıymetli metal miktarının %95'i metalik faz içerisinde toplandığı tespit edilmiştir. Ergitme prosesi sırasında, %20 ve %30 curuflaştırıcı miktarı, toplayıcı metal kullanıldığı durumda %20 ve %30 bakır miktarı ile 10% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 30% SiO<sub>2</sub>, 30% CaO, 10% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5% CaF<sub>2</sub> içeren curuflaştırıcı bileşimi, toplayıcı metalin kullanılmadığı durumlarda ise 43% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 18% SiO<sub>2</sub>, 12% CaO, 18% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5% CaF<sub>2</sub> içeren curuflaştırıcılar ile en yüksek altın ve gümüş geri kazanımı elde edilmiş olduğundan kıymetli metallerin geri kazanımı sırasında en yüksek uygun şartlar olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** E- atık, Geri kazanım, Baskılı Devre Kartı, Curuflaştırıcı, Kollektör Metal, Kıymetli Metaller

**INVESTIGATION OF THE MELTING CONDITIONS FOR THE RECOVERY OF  
PRECIOUS METAL FROM PRINTED CIRCUIT BOARDS**

Özlem ATASOY KOCATÜFEK

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Muhlis Nezihi SARIDEDE

One of the most important problems of technological developments in today's world is electric and electronic waste (E-waste). The e-wastes contain certain heavy metals, plastics and flame retardants etc., threats to health and environment. Due to precious metal contents, e-wastes especially PCB's, has an economic value. Therefore, the recycling of PCBs is an important subject, not only from the hazardous effects, but also with respect to the recovery of valuable materials. The recovery and recycling processes of e-wastes mainly are classified into pyrometallurgical, hydrometallurgical and electrometallurgical processes. In the pyrometallurgical process, e-wastes are melted with several metal concentrates and flux components as slag formatives at high temperature. As a result of melting process, valuable metals are accumulated in metallic phase and then the extracted valuable metals are separated and purified with other processes.

In this study, the effect of collector metal and composition and quantity of fluxes, for the recovery of precious metals from PCB's in discarded computers are examined using with pyrometallurgical method. The waste PCB's were manually dismantled and cut to a size of 2,5cm-2,5cm, incinerated at 850-950°C. In each experiment, residues contain precious metals were melted adding different types of fluxes and with/without copper as a collector metal at 1250-1350°C.

According to the experimental results, the amount of input 95% of the precious metals could be collected in metallic phase. In melting process high recovering ratios have been e in %20 and %30 flux level, in the presence of collector metal; %20-%30 copper level, 10% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 30% SiO<sub>2</sub>, 30% CaO, 10% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5% CaF<sub>2</sub> flux composition, in the absence of collector metal; 43% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 18% SiO<sub>2</sub>, 12% CaO, 18% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5% CaF<sub>2</sub> flux compositions, have been determined most appropriate conditions for recovering of precious metals.

**Key words:** E-waste, recycling, recovery, WEEE, RoHS, Printed Circuit Boards, recycling



### GİRİŞ

#### 1.1 Literatür Özeti

Günümüz yaşam tarzı, teknoloji ürünlerinin kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır. Elektrikli ve elektronik ekipman kullanımındaki artış ile birlikte üretim miktarları da artması, bu cihazların sahip oldukları teknolojik özellikler ve işlevsellikleri nedeniyle hızlı tüketimi, üretim kademesinden başlayarak, nihai kullanıma kadar atık oluşumuna neden olmaktadır [1]. Bu nedenle, elektrikli ve elektronik ekipman atıkları, günümüzde dünya üzerinde en çok artış gösteren atık sistemi özelliği taşımaktadır. Hammadde kaynaklarının sınırsız olmayışı ve toksik atıkların çevresel etkileri ile birlikte, bu atıkların yapılarında bulunan kıymetli metallerin artan metal fiyatları sonucu ekonomik bir değer oluşturması, geri kazanımı mutlak bir zorunluluk haline getirmiştir [2].

#### 1.2 Tezin Amacı

Geri kazanım koşullarının incelenmesi adına gerçekleştirilen bu tez çalışmasında elektrikli ve elektronik atıklar, özelinde ise baskılı devre kartlarında mevcut bulunan kıymetli metallerin geri kazanılmasında ergitme şartlarının; curuflaştırıcı bileşimi ve miktarının, kolektör metal varlığı ve miktarı, değişkenlerinin incelenmesine yönelik deneysel çalışmalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

#### 1.3 Hipotez

Baskılı devre kartlarının pirometalurjik olarak geri kazanımında, ergitme sırasında kullanılan curuflaştırıcıların bileşimi ve miktarları ile kolektör metal ilavesi ve kolektör metal miktarları, ergitme şartlarında farklılıklar göstererek, kıymetli metallerin geri kazanım verimlerini değiştirmektedir.

### ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMAN ATIKLARINA GENEL BAKIŞ

Teknolojik ilerlemeler ve sanayileşme faaliyetlerinin gelişmesi, üretim miktarları, ürün çeşitliliği ve üretim hızlarının artmasına neden olmuştur. Bu durum, nüfusun artması ile birlikte daha çok tüketim oranlarının yükselmesi ve buna bağlı olarak da atık miktarlarının artmasına neden olmuştur. Üretim sırasında, sınırsız olmayan hammadde kaynaklarının hızlı bir şekilde tüketimi, enerji sorunları, atıklardan kaynaklanan çevresel sorunlar ve insan sağlığına zararları, üretimden başlanarak nihai ürün oluşumu ve atık oluşumu geri kazanımın ve tekrar kullanımın öneminin artmasına neden olmuştur.

Geri kazanım ve tekrar kullanım, kullanım dışı kalan geri dönüştürülebilir malzemelerin çeşitli geri dönüşüm yöntemleri ile hammadde olarak tekrar üretim süreçlerine kazandırılması yöntemlerini içermektedir. Avrupa Birliği ülkelerinde geri dönüşüm yoluyla atıkların azaltılması 1960'lı yıllardan beri devlet tarafından yapılan uygulamalarla teşvik edilmektedir. Avrupa Birliği ülkeleri, çevresel etkileri azaltmak için, ambalaj atıkları, hurda araçlar, piller, elektrikli ve elektronik atıklar konularına öncelik vermektedirler. Birçok Avrupa Birliği ülkesinde atık toplama, tekrar kullanma, geri dönüşüm ve bertaraf etme konularında çeşitli kanunlar çıkarılmıştır [1].

Aşağıda verilen Çizelge 2.1'de atık materyallerin üretimde tekrar kullanılması durumunda enerji, hava kirlenmesi, su kirlenmesi vb. faktörlerdeki değişimler verilmiştir. Verilere göre, atıkların tekrar kullanılması durumunda, enerji verimliliği %23 ile %74 arasında artış göstermiştir. Bu durum geri kazanım ve yeniden kullanımın özellikle enerji tüketiminin azaltılması üzerindeki etkisini göstermektedir.

Çizelge 2.1 Atık materyallerin üretimde tekrar kullanılması sonucu çeşitli faktörlerdeki (%) azalmalar [2]

Faktörler	Kağıt	Cam	Çelik	Alüminyum
Enerji	23-74	4-32	47-74	90-97
Hava Kirlenmesi	74	20	85	95
Su Kirlenmesi	35	-	76	97
Madencilik Atıkları	-	80	97	-
Su tüketimi	58	50	40	-

## 2.1 Elektrikli ve Elektronik Atıklar

Elektrikli ve elektronik atıklar, materyal ve kompozisyon özellikleri açısından farklılıklar gösteren ve hızla büyük oranlarda açığa çıkan kompleks yapılardır. E-Atık (elektronik atık) ya da İngilizce tanımıyla WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment), kullanım ömrünü tamamlamış, içerisinde bir veya daha fazla elektrik iletim elemanı bulunduran ürünlere verilen addır. E-Atık için kabul edilmiş kesin bir kapsam olmamakla beraber bozuk, kırık, tamir edilemez olarak görülen veri işleme, telekomünikasyon, iş, eğlence veya ev için kullanılan araç gereçler genel olarak bu gruba dâhil edilmektedir [3].

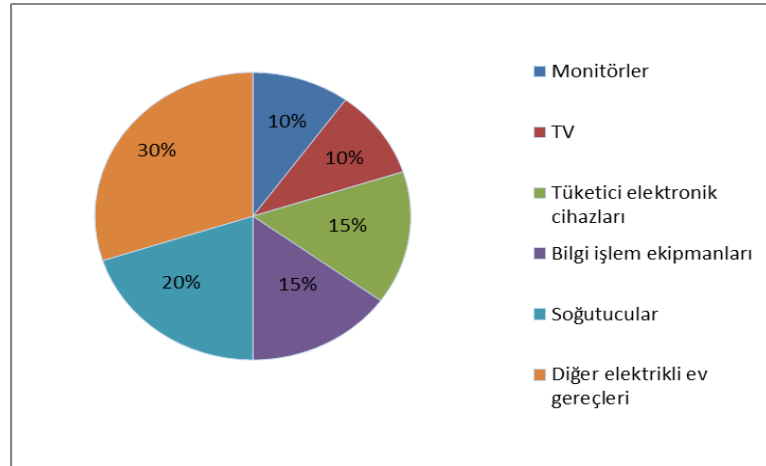
### 2.1.1 Elektrikli ve Elektronik Atık Kaynaklarının Sınıflandırılması

2006 yılı verilerine göre, Avrupa Birliği ülkelerinde 8 milyon ton “Elektrikli ve Elektronik Atık” açığa çıkmıştır ve bununla birlikte her yıl %3-5 oranında atık miktarında artış görülmektedir [4]. Tüm dünya çapında bu rakamın toplamda 20 ila 50 milyon ton arasında olduğu tahmin edilmektedir [5]. Oldukça yüksek miktarda açığa çıkan bu tip atıkların, en genel olarak sınıflandırılması, 2002/96/EC Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıkları Direktifi içerisinde belirtilmiştir. Buna göre AEEE’ler;

- Ev elektroniği (küçük cihazlar)
- Ev elektroniği (büyük cihazlar)
- IT ve haberleşme cihazları
- Tüketici ürünleri

- Aydınlanma ürünleri
- Elektrik ve elektronik aletler (sabit ve büyük endüstriyel cihazlar hariç)
- Oyuncaklar, eğlence ve spor için üretilen ürünler
- Tıbbi cihazlar (implant ürünleri ve enfeksiyon taşıyanlar hariç)
- Ölçüm ve kontrol cihazları
- Otomatik atık cihazları

Olarak sınıflandırılmaktadır. Birleşmiş Milletler verilerine göre, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının %10'u televizyon, %10'u monitör, %15'i tüketici elektronik cihazları, %15'i bilgi ve iletişim ekipmanları, %20'si soğutucular ve %30'u diğer elektrikli ev gereçleridir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Elektrikli ve elektronik atıkların ürüne göre dağılımı [6]

### 2.1.2 Elektrikli ve Elektronik Atıkların Materyal İçerikleri ve Kimyasal Bileşimi

Elektronik atıklar genel olarak, %15-30 plastikler, %30 refrakter oksitler, %40-60 oranında çeşitli metallere meydana gelmektedir. Demir-çelik, bakır, alüminyum gibi metaller, çeşitli plastik ve seramik materyaller ile bağlanmış veya kaplanmış olarak ana yapıyı oluşturmaktadırlar [7]. Çeşitli elektrikli ve elektronik atıklara ait materyal miktarları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 AEEE'lere ait materyal içerikleri [8]

Ekipman Kategorisi	Materyal Yüzdesi				
	Demir	Demir Dışı	Cam	Plastik	Diğer
Büyük ev aletleri	61	7	3	9	21
Küçük ev aletleri	19	1	0	48	32
Bilişim teknolojisi cihazları	43	0	4	30	20
İletişim cihazları	13	7	0	20	6

Elektronik atıklara ait materyal içerikleri üretim zamanı, menşei ve üreticiye göre farklılıklar göstermektedir ve literatürde ürün çeşidine göre ortalama değerler bulunmaktadır. Atıklar üretim zamanlarına göre değerlendirildiğinde, kompozisyon açısından çeşitli farklılıklar göstermektedir. Teknolojik gelişmeler ile üretilen yeni cihazların sahip oldukları kıymetli metal miktarları, eski cihazlara göre daha düşüktür. Örneğin 1980'li yıllarda kontakt katmanları içerisindeki kıymetli metal kaplamaları 1-2,5µm iken, modern uygulamalarda bu rakam 300 ile 600nm arasında değişmektedir [9]. Örneğin 1972 yılında üretilmiş olan elektronik atığın içerdiği gümüş miktarı tüm diğer atıkların içerdiği gümüş miktarından yüksek olduğu görülmektedir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3 Çeşitli AEEE'lerin metal kompozisyonu [9]

E-Atık	Ağırlık (%)					Ağırlık (ppm)	
	Fe	Cu	Al	Pb	Ni	Ag	Au
TV Devresi	28	10	10	1	0,3	280	20
PC Devresi	7	20	5	1,5	1	1000	250
PC	20	7	14	6	0,85	189	16
Cep Telefonu	5	13	1	0,3	0,1	1380	350
Taşınabilir Ses Sistemleri	23	21	1	0,14	0,03	150	10
DVD Player	62	5	5	0,3	0,01	115	15
PC Anakart	4,5	14,3	2,8	2,2	1,1	639	566
Baskı Devresi Kartı	12	10	7	1,2	0,85	280	110
Elektronik Atık (1972 yılı üretimi)	26,2	18,6	-	-	-	1880	220
Karışık e-atık	36	4,1	4,9	0,29	1	-	-

Elektrikli ve elektronik atıklar, bakır, altın, gümüş, demir vb. metalleri içermesinin yanı sıra, az miktarda indiyum, rutenyum, selenyum içermektedirler (Çizelge 2.4). Dünya üzerinde üretilen selenyumun %80'i LCD ekranlarda, rutenyumun %80'i hard disklerde ve rutenyumun %50'si alev geciktiricilerde kullanılır. Bu metallerin bazıları yenilenebilir enerji üretimi için büyük önem taşımaktadır. Selenyum, telleryum ve indiyum, güneş panellerinde, platin ve rutenyum yakıt hücrelerinin platin değişimli membranlarında kullanılmaktadır [10].

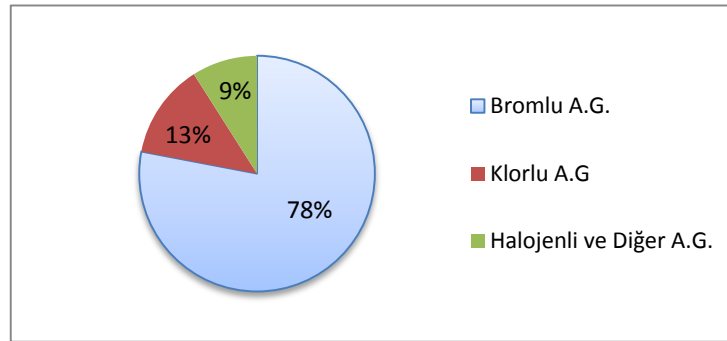
Çizelge 2.4 Kişisel bilgisayarların elementel analizi ve geri dönüşüm oranları [11]

Element	İçerik (%)	Geri Dönüşüm Oranı (%)	Bulunduğu Konum
Plastikler	22,9	20	Kasa, Mekanik parçalar
Kurşun	6,2	5	Katot ışını tüpü, Baskılı Devreler
Aluminyum	14,17	80	Kablo, Baskılı Devreler
Germanyum	0,0016	0	Baskılı devreler
Galyum	0,0013	0	Baskılı devreler
Demir	20,47	80	Katot ışını tüpü, Baskılı Devreler
Kalay	1,007	70	Katot ışını tüpü, Baskılı Devreler
Bakır	6,92	90	Katot ışını tüpü, Baskılı Devreler
Baryum	0,031	0	Katot ışını tüpü
Nikel	0,85	80	Katot ışını tüpü, Baskılı Devreler
Çinko	2,2	60	Katot ışını tüpü, Baskılı Devreler
Tantal	0,015	0	Baskılı devreler
İndiyum	0,0016	60	Baskılı devreler
Vanadyum	0,0002	0	Katot ışını tüpü
Terbiyum	<0	0	Katot ışını tüpü
Berilyum	0,157	0	Baskılı devreler, Konnektörler
Altın	0,0016	99	Baskılı devreler, Konnektörler
Eropyum	0,0002	0	Katot ışını tüpü
Titanyum	0,0157	0	Kasa
Rutenyum	0,0016	80	Baskılı devreler
Kobalt	0,0157	85	Katot ışını tüpü, Baskılı Devreler
Paladyum	0,0003	95	Baskılı devreler, Konnektörler
Mangan	0,0315	0	Katot ışını tüpü, Baskılı Devreler
Gümüş	0,0189	98	Baskılı devreler, Konnektörler
Antimon	0,0094	0	Baskılı devreler
Bismut	0,0063	0	Baskılı devreler
Krom	0,0062	0	Kasa
Kadmiyum	0,0094	0	Katot ışını tüpü, Baskılı Devreler
Selenyum	0,0016	70	Baskılı devreler

Çizelge 2.4 (Devamı)

Niobyum	0,0002	0	Kasa
İtriyum	0,0002	0	Katot ışını tüpü
Rodyum	<0	50	Baskılı devreler
Platin	<0	95	Baskılı devreler
Civa	0,0022	0	Baskılı devreler
Arsenik	0,0013	0	Baskılı devreler
Silis	24,88	0	Katot ışını tüpü, Baskılı Devreler

Elektrikli ve elektronik atıkların %30'luk kısmını oluşturan plastik malzemeler, yapıda bulunan metalik malzemeler kadar çeşitlilik göstermektedir. Polietilen (PE), polivinilklorür (PVC) ve polipropilen (PP) yaygın olarak kullanılan plastiklerdir. Özellikle son 20 yılda, çeşitli elektrikli ve elektronik ekipmanlarda kullanılan plastikler, düşük enerjili alev karşısında, yanıcı maddelerin yanmasını azaltmak, ya da engellemek için, bu maddelerin içerisine karıştırılan ya da yüzeyine uygulanan bileşikler, alev geciktiriciler ile kullanılmaktadır [12]. Ortalama olarak kişisel bir bilgisayarda 1,7kg alev geciktirici kullanılmaktadır. Bu değerın %70'i bilgisayar kasasında, kalan kısmı ise baskılı devrelerde bulunmaktadır [7]. Alev geciktiriciler, halojenli, bromlu ve klorlu bileşenlerine göre üç ana kategoride kullanılmaktadır (Şekil 2.2)

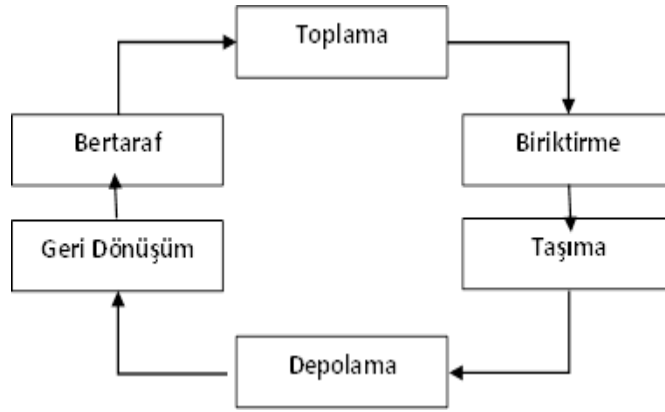


Şekil 2.2 AEEE'lerde kullanılan alev geciktiricilerin % dağılım miktarları [7]

Şekilden de görüldüğü üzere, bromlu alev geciktiriciler, en yaygın olarak kullanılan alev geciktiricileri oluşturmaktadır. Ancak, bu tip alev geciktiriciler, geri kazanım işlemleri sırasında özellikle düşük sıcaklıklarda yakıldığında, bakırın katalizör etkisi ile PPDB (Polibromlu Dibenzodiyoksın) ve PBDF (Polibromlu Dibenzofuran) gazlarının oluşumuna neden olur. Bu gazların çevre ve insan sağlığı açısından zararları oldukça önemlidir [7].

### 2.1.3 Elektrikli ve Elektronik Atıkların Geri Kazanımları

Atık durumdaki elektrikli ve elektronik ekipmanlarının geri kazanımları toplamadan taşımaya, depolamadan işlemeye, nihai bertaraftan raporlamaya kadar bir dolaşım sisteminin oluşturulmasını ve yönetilmesini gerektirmektedir (Şekil 2.3) . Tüm katı atıklarda uygulanan yönetim stratejisi, özellikle yapılarında bulundurdukları çevre ve insan sağlığına zararlı toksik bileşiklerden dolayı, elektrikli ve elektronik atıklarda önem kazanmaktadır. Aynı zamanda, içerdikleri çeşitli metal kompozisyonları ve bunların geri dönüşümü kaynak tüketiminin azaltılması ve ekonomik değer oluşturması açısından geri dönüşüm oranlarının artırılmasını zorunlu kılmaktadır.



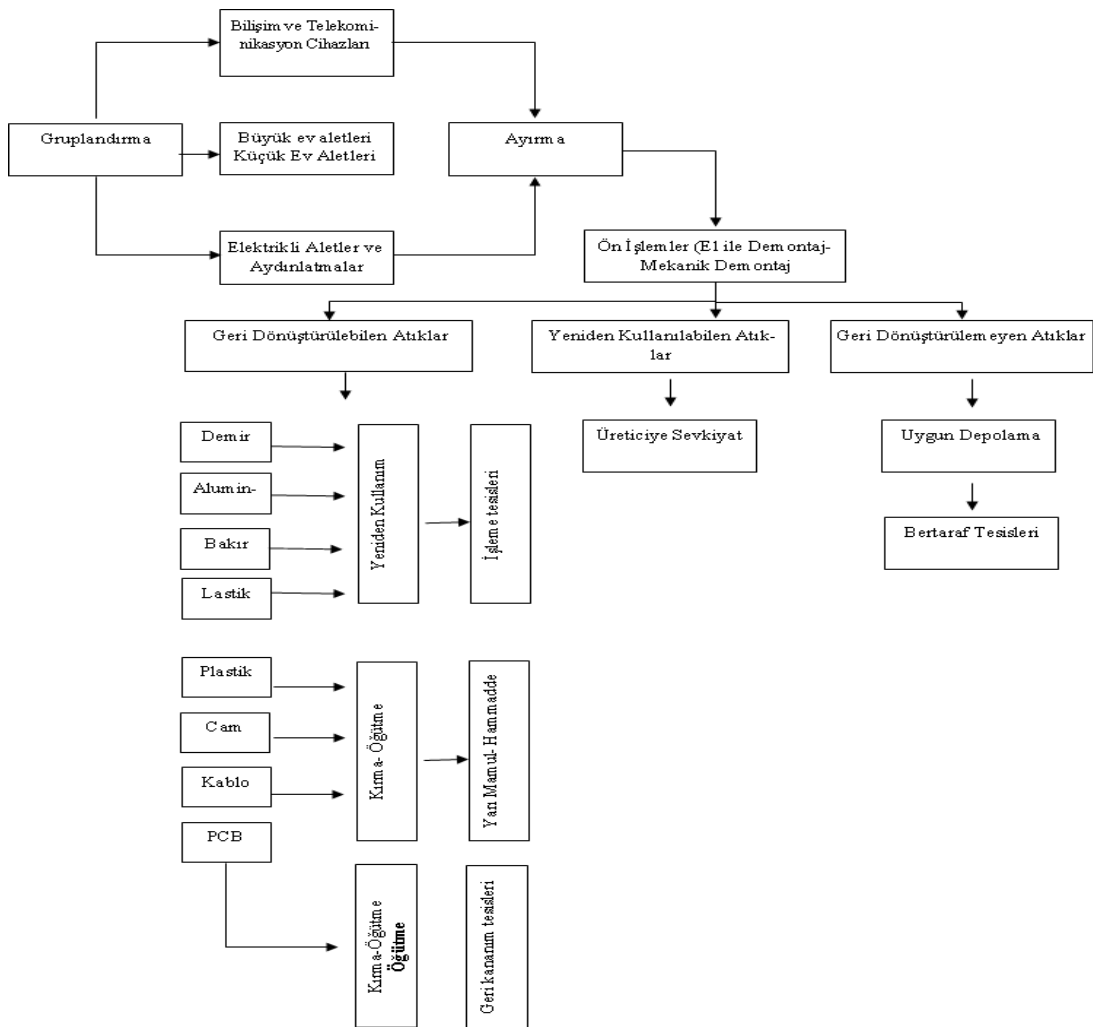
Şekil 2.3 AEEE geri dönüşüm döngüsü

Elektronik atıkların toplama izninin sadece yetkili (lisanslı) geri dönüşüm kuruluşlarına verilmesi gerekmektedir. Biriktirme yapılırken atık elektrikli ve elektronik ekipmanların evsel ve diğer atıklar ile karıştırılmaması ve atıkların biriktirilmesine uygun standart konteynırlarda toplanması gerekmektedir [13]. Geri kazanım işlemlerinin ilk basamağı olan gruplandırma işlemlerinde atıklar, yapılarında bulundurdukları toksik ve malzeme özelliklerine göre ayrılırlar. Örneğin; büyük ev eşyaları, televizyonlar ve bilgisayarlar ayrı ayrı gruplandırılarak ön işlemlere tabi tutulurlar. Materyal geri kazanım prosesi için toplanan ekipman, “yeniden kullanılabilir” veya “geri dönüştürülebilir” olarak iki kategoriye ayrılmaktadır [15]. Ön işlemler sırasında, yeniden kullanılabilen kısımlar ayrılarak üreticilere gönderilir, toksik özellik taşıyan kısımlar ise çıkartılarak depolama ya da bertaraf işlemlerine gönderilmektedir. Bilgisayar hurdalarındaki baskılı devreler



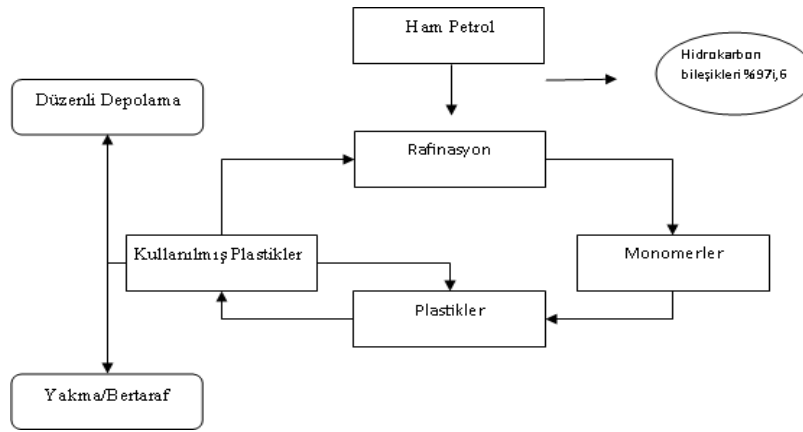
ise el ile demontaj ve mekanik işlemler ile veya bu işlemlerin kombinasyonları şeklinde ön işlemlere tabi tutulurlar [14].

Ön işlemlerden açığa çıkan üç ana fraksiyon, nihai işlemler basamağında işleme tabi tutulurlar. Demir içeren kısımlar, demir çelik fabrikalarında demir geri kazanımına, alüminyum içeren kısımlar alüminyum tasfiye fırınlarına, kurşun ve bakırlı kısımlar ile baskılı devreler ve diğer kıymetli metal içeren kısımlar entegre metal izabe tesislerine gönderilerek, demir, bakır, alüminyum ve kıymetli metallerin geri kazanımı gerçekleştirilir [16]. Şekil 2.4'de tüm elektrikli ve elektronik ekipman atıklarına ait geri kazanım yöntemlerinin akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.4 AEEE'lerin geri kazanım işlemleri akış şeması [17]

Manuel demontaj işlemleri sırasında, metal gibi değerli ikincil hammaddeler yanı sıra atık yakma tesislerinde ikincil yanıcı hammadde olarak kullanılacak olan plastikler de yüksek oranlarda geri kazanılmakta ve petrokimya endüstrisi için hammadde veya metal izabesinde indirgeyici olarak kullanılmaktadırlar (Şekil 2.5). Mekanik ayırma yöntemlerinde kırma ve öğütme işlemleri sonrasında dolgu malzemesi olarak, termal proseslerde sonrasında ise alternatif yakıt kaynağı olarak kullanılmaktadırlar [18].



Şekil 2.5 Plastiklerin geri dönüşüm işlemleri akış diyagramı [19]

#### 2.1.4 Elektrikli ve Elektronik Atıklardaki Zararlı Bileşenler

Elektrikli ve elektronik ekipman atıkları, çeşitli kullanım amaçlarına göre bünyelerinde birçok zararlı bileşen içermektedir. Özellikle atıkların içerisinde bulunan Pb, Cr+6, Cd, Hg, PBF ( Polibromürlü Bifenil), PBDE (Polibromürlü Difenil Eter) gibi bileşenlerin uluslararası standartlarda üretim sırasında kullanımları yasaklanmış veya miktarları sınırlandırılmıştır. Bu bileşenler kullanım yerleri ve çevre-insan sağlığı açısından etkileri sonucu incelendiğinde aşağıda verilen bilgiler elde edilmektedir.

- Kurşun (Pb): Katot ışın tüpleri, eski lehimler ve entegre devreler kurşun içerir. Kurşun; sinir sistemi, endokrin ve dolaşım sisteminde hasara neden olur. Böbrek ve taşıma sistemlerine zarar vermekte ve kansızlığa neden olmaktadır [19].

- Civa (Hg):Termometrelerde, pillerde, katot ışın tüplerinde ve lambalarda bulunmaktadır. Beyin, böbrek ve üreme organlarına zarar vermektedir. Vücutta yağ hücrelerinde birikmekte ve anne sütüyle bebeklere geçebilmektedir [20].
- Kadmiyum (Cd): NiCd pillerin yapısını oluşturan ana bileşendir. Yarı iletkenler ve kaplamalar kadmiyum içerir. Ayrıca plastiklerde stabilizatör olarak kullanılır. Solunma sonucu toksik etki göstermekte ve yüksek miktarlarda ise akciğer kanserine neden olmaktadır. Aynı zamanda kansızlığa neden olabilmektedir [21].
- Bromlu Alev Geciktiriciler (BFR – Brominated Flame Retardants): İnsan sağlığı açısından kanserojen etki ve endokrin sistem üzerinde olumsuz etki gösterirler. Hormonal fonksiyonları önemli derecede etkilemekte ve gelişme bozukluğuna neden olurlar. Düzenli depolama alanlarından çözünerek toprağa sızabilmekte ve buharlaşarak belirli mesafelere yayılabilmektedirler. Biyolojik olarak birikir ve aktarılırlar. Yakılmaları halinde ise dioksin ve furan oluşumuna sebebiyet verirler [21].
- Baryum (Ba): Katot ışını tüplerinde kullanılır. Kısa süre baryuma maruz kalma beyin şişmesine, kas zayıflığına, kalp ve karaciğer hastalığına neden olabilmektedir.
- Altı Değerlikli Krom (Cr+6): Metallerin kaplanması ve yüzey işlemleri sırasında kullanılmaktadır. Gözle direkt temasında kalıcı hasara neden olmaktadır. Aynı zamanda, burun, boğaz ve ciğerlerde tahrişe neden olmaktadır. Uzun süre solunduğunda, akciğer kanserine neden olabilmekte ve yüksek miktarlara maruz kalındığında böbreklerde hasar oluşturmaktadır [20].
- Berilyum (Be): Ana kart ve bağlantılarda bulunur. Özellikle, solunduğunda toksik etki göstermektedir. Solunma sonucu kanser oluşumuna neden olabilmektedir. OECD verilerine göre, “tehlikeli olmayan materyal” olarak sınıflandırılmasına rağmen, geri kazanım işlemleri öncesi ayrılması gerekmektedir.

- Nikel (Ni): Endokrin, bağımsızlık sistemi, deri ve gözler üzerinde olumsuz etkiye sahiptir.
- Plastikler: Bir bilgisayarda ortalama 7 kg civarında PVC (Polivinil klorid) de içeren plastik bulunur. Belli sıcaklıkta yandığında dioksin oluşur. Plastik kombinasyonlu baskılı devrelerde, PVC en tehlikeli plastiktir [11].

## 2.2 Elektrikli ve Elektronik Atıklar İle İlgili Yasal Düzenlemeler

Atık yönetimi, 1970'lerden beri, Avrupa Birliği çevre politikalarının odaklarından biri olmuştur. Atıkların giderek artan oranda azaltılmasını, yeniden kullanılmasını ve geri dönüştürülmesini gerektiren bu gibi politikalar, atıklardan elde edilen malzemeleri üretim için girdi olarak sunmak suretiyle, tüm ekonomide malzeme kullanımı döngüsünü tamamlamaktadır [22]. Bu bağlamda, Avrupa Birliği Komisyonu tarafından 27.01.2003 tarihinde Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıkları Direktifi (WEEE-2002/96/EC Waste Electrical and Electronic Equipment) ve Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanılmasının Sınırlandırılması Direktifi (RoHS-2002/95/EC The Restriction of The Use of Certain Hazardous in Electrical and Electronic Equipment) olarak yayınlanmıştır.

2002/96/EC Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıkları Direktifin amacı; elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının oluşumunun önlenmesi ve bu tür atıkların azaltılması için yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve diğer geri kazanım şekillerinin geliştirilmesidir. Ekonomik işletmelerin (üreticiler, dağıtıcılar ve tüketiciler) çevresel performanslarının geliştirilmesi, bu atıkların belirli bir işleme tabii tutulmasını gerektirmektedir [23].

Direktifin içeriği özetlenirse, üye ülkeler, ürün tasarım aşamasındayken elektrikli ve elektronik ekipmanların atıklarının parçalanabilirlik olanaklarını, geri kazanımını, özellikle yeniden kullanımını ve geri dönüşümünü göz önüne alarak dizayn edilmesini ve üretilmesini teşvik edeceklerdir. Elektrikli ve elektronik atıkların ayrılmamış olarak belediye çöplüklerine verilmesini en aza indirecek ve bu atıklar için ayrı toplama sistemi kuracaklardır ve atıklarının yetkilendirilmiş kuruluşlara iletilmesini garanti edeceklerdir. Elektrikli ve elektronik ekipman üreticileri en iyi, geri kazanım ve geri

dönüşüm teknikleri işlemleri uygulamalı ve bunun için sistem oluşturmalarıdır. Tüm bu işlemleri organize etmek ve gerekli finansmanı sağlamanın sorumluluğu üreticilere yüklenmiştir. Üreticiler bunu tek başlarına veya birleşerek toplu halde yapma serbestisine sahiptir. 13 Ağustos 2005 tarihinden sonra piyasaya sürülen EEE'nin üreticileri, cihaz üzerine konan bir işaret ile tanımlanabilir olmak zorundadır (Şekil 2.6) [24].



Şekil 2.6 Atık durumdaki AEEE'lerin belirleyici sembolü [24]

WEEE, elektrikli ve elektronik atıklara ait bir atık yönetimi prensibi oluştururken RoHS elektrikli ve elektronik ekipmanların bazı tehlikeli madde içeriklerinin azaltılması ile ilgilidir. 2002/95/EC -RoHS Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanılmasının Sınırlandırılması Direktifi kapsamında, 1 Temmuz 2006 tarihinden itibaren ise piyasada yer alacak elektrikli ve elektronik ekipmanlarda kurşun, civa, kadmiyum, heksavalent krom, PBB (çok bromlu bifenil) ve PBDE (çok bromlu difenil seteril) maddelerinin diğer maddelerle değiştirilmiş olması gerekmektedir. Direktif kapsamında sınırlandırılan maddeler ve miktarlar Çizelge 2.5'de gösterilmektedir.

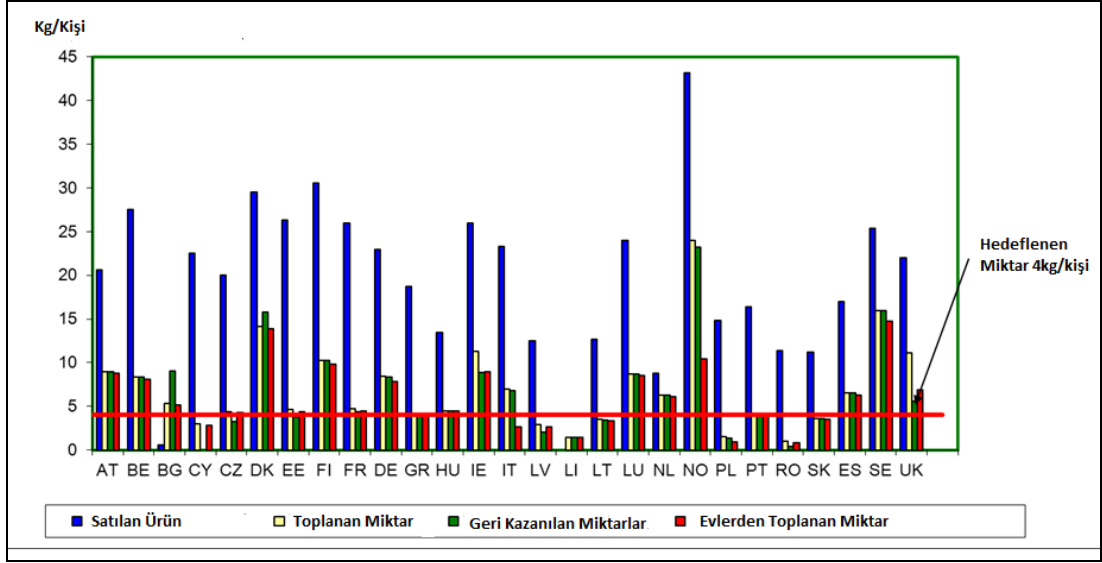
Çizelge 2.5 RoHS kapsamında sınırlandırılan materyaller [25]

Bileşen	Maksimum Miktar (ppm)	Kullanım Yerleri	Analiz Yöntemleri
Kadmiyum	100	Elektroliz kaplamalar, NiCd piller	ICP, AAS, XRF
Civa	1000	Piller, sensörler, floresan lamba	AAS, XRF
Krom(+6 )	1000	Krom kaplamalar	XRF
Polibromürlü bifenil	1000	Alev geciktirici malzeme	XRF
Polibromürlü difenileter	1000	Alev geciktirici malzeme	XRF
Kurşun	1000	Lenim, PCB, piller	ICP, AAS, XRF

2005/95/EC ve 2005/96/EC sayılı Direktifler hızla elektrikli ve elektronik ekipmanların (EEE) atık üretimine mani olmak üzere tasarlanmıştır. EEE'nin artan geri dönüşümü, nihai olarak ortadan kaldırılacak olan atığın toplam miktarlarını sınırlandıracaktır. Üreticiler, EEE'nin geri alınması ve geri dönüştürümünden sorumlu olacaklardır; böylece, EEE'nin çevresel açıdan daha etkin bir şekilde tasarlanması için teşvik sağlanmış ve atık yönetimi konularının tamamı göz önüne alınmış olacaktır.

### 2.3 Türkiye ve Dünyadaki Elektronik Atık Durumu

BM Çevre Programının 2006 yılı raporuna göre, yıllık 20-50 milyon ton arasında seyreden ve her yıl %5-8 arasında artış gösteren e-atık miktarı üretilen yıllık atığın yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır. OECD Çevre Raporu'na göre Türkiye'nin de aralarında bulunduğu gelişmekte olan ülkelerde, 2010 yılı itibariyle çevreyi tehdit eden e-atık miktarının 3 katına çıkması beklenmektedir. AB üyesi ülkelerde 2005'te ortaya çıkan 8,3 milyon tonluk e-atığın yalnızca 2,2 milyon tonu toplanabilmiştir [6]. Şekil 2.7'de 2009 yılı itibariyle Avrupa Birliği ülkelerine ait yıllık kişi başına satılan, toplanan ve geri kazanılan elektrikli ve elektronik atık miktarları verilmiştir [27].

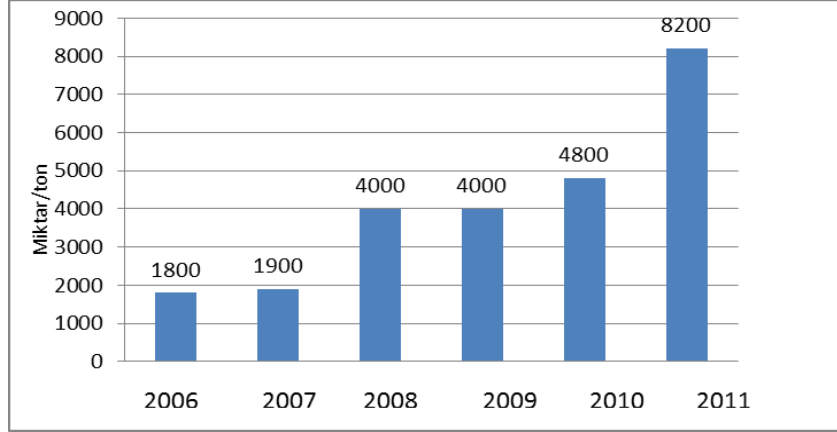


Şekil 2.7 AB ülkelerinde 2009 yılı itibariyle satılan toplana geri kazanılan AEEE miktarları [27]

BM Çevre Programının (UNEP) tarafından açıklanan rapora göre, ABD, elektronik atık olarak nitelendirilen telefon, yazıcı, televizyon, bilgisayar ve benzeri elektronik cihaz atıklarının en büyük üreticisi durumunda bulunmakta ve yılda 3 milyon ton elektronik atık açığa çıkarmaktadır. ABD'yi yılda 2,3 milyon ton atık miktarı ile Çin takip etmektedir.. Çin aynı zamanda diğer gelişmekte olan ülkelerden de atık ithalatı yapmaktadır. UNEP tarafından hazırlanan rapora göre, elektronik atık miktarının, özellikle gelişmekte olan ülkelerde gelecekte büyük oranda artış göstereceği belirtilmektedir. Çin ve Güney Afrika'da 2020'ye kadar bilgisayarları kapsayan e-atıkların 2007 seviyesine göre yüzde 400 oranında artacağı tahmin edilmektedir [6].

Türkiye'de ise, Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılmasına Dair Yönetmelik 31.05.2008 tarih ve 26891 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak 31.05.2009 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Yönetmelik gereğince, elektrikli ve elektronik eşya üreticileri ithal veya imal yoluyla piyasaya sürdükleri elektrikli ve elektronik eşyalarda kurşun (Pb), cıva (Hg), artı altı değerlikli krom (Cr6+), polibromürlü bifeniller (PBB) ve polibromürlü difenil eterler (PBDE) ile kadmiyumun (Cd) bulunmamasını sağlamakla yükümlüdürler. 2006-2011 yılları arasında, atık elektrikli ve elektronik eşyalarla ilgili yönetmelik bulunmadığından, bu tür atıkların toplanması, ayrıştırılması, yeniden kullanımı vb. işlemlerin ilgili tesisler tarafından gerçekleştirilmesi için Çevre Bakanlığı tarafından ilgili tesislere uygunluk yazısı verilmiştir. Uygunluk yazısı

verilen firmalar tarafından 2011 yılında kayıt altına alınan AEEE toplama miktarı yaklaşık 8.000 tondur (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 2006-2011 yılları arasında Türkiye’de toplanan AEEE miktarı[26]

Türkiye’de bakanlık tarafından uygunluk yazısı verilmiş kayıtlı 21 adet elektronik atık işleme tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerde atıklar çevre mevzuatına uygun olarak parçalanmakta ve demir, bakır, alüminyum, krom, pirinç, plastik, karton gibi malzemeler geri kazanılmaktadır. Yurt içinde kullanım olanağı olmayan elektronik devre, elektronik komponent, elektrikli malzemeler ile plastik değerlendirilmek üzere Belçika, Almanya ve Fransa gibi ülkelere ihraç edilmektedir [26].

Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği, elektrikli ve elektronik atıkların üretiminden nihai bertarafına kadar çevre ve insan sağlığının korunması, elektrikli ve elektronik atıkların oluşumunun ve bertaraf edilecek atık miktarının azaltılması için yeniden kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım yöntemleri ve hedefleri ile ithalat, ihracat ve transit geçişlere ilişkin hukuki ve teknik esasları düzenlemek amacıyla, Mayıs 2012 tarihinde Çevre Bakanlığı tarafında Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Yönetmelik kapsamında, Çevre Bakanlığı tarafından 2018 yılına kadar, AEEE’lerin yıllık olarak toplama hedefleri belirlenmiş ve 2018 yılında kişi başına toplanacak olan AEEE miktarı toplamda 4kg olarak hedeflenmiştir (Çizelge 2.6).



Çizelge 2.6 Yıllık bazda hedeflenen AEEE toplama miktarları [28]

EEE Kategorileri	Yıllara göre Toplama hedefi (kg/kişi-yıl)				
	2013	2014	2015	2016	2018
Buzdolabı/soğutucular/iklimlendirme cihazları	0,05	0,09	0,17	0,34	0,68
Büyük beyaz eşyalar	0,1	0,15	0,32	0,64	1,3
Televizyon ve monitörler	0,06	0,1	0,22	0,44	0,86
Bilişim ve telekomünikasyon ve tüketici ekipmanları	0,05	0,08	0,16	0,32	0,64
Aydınlatma ekipmanları	0,01	0,02	0,02	0,04	0,08
Küçük ev aletleri, elektrikli ve elektronik aletler, oyuncaklar, spor ve eğlence ekipmanları, izleme ve kontrol aletleri	0,03	0,06	0,11	0,22	0,44
TOPLAM EVSEL AEEE (kg/kişi-yıl)	0,3	0,5	1	2	4

## BÖLÜM 3

### BASKILI DEVRE KARTLARI

Elektronik cihazların temel parçalarından biri olan baskılı devre kartları, İngilizce "Printed Circuit Boards- PCB "elektronik devre elemanlarını monte etmek için bakır yollar, içi lehim kaplı delikler ve bakır adalar içeren değişik materyallerden yapılmış plakalardır [29].

Endüstriyel uygulamalarda PCB'lerin en çok kullanıldığı elektrikli ve elektronik ekipmanlar, %19,23 oran ile bilgisayarlardır. Bilgisayarları, %10,55 ile televizyonlar, %9,95 ile de kontrol cihazları izlemektedir. Aynı zamanda, baskılı devre kartlarının, atık olarak elde edildiği en önemli kaynak, Çizelge 3.1'de görüldüğü üzere bilgisayarlardır.

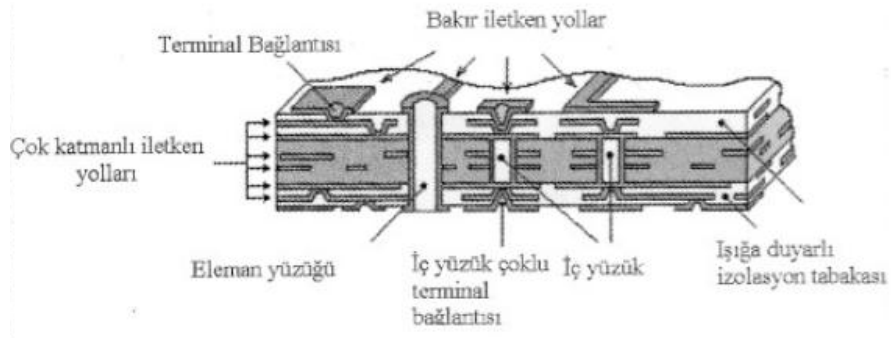
Çizelge 3.1 PCB kaynakları ve miktarları [31]

PCB Kaynakları	Miktar (%)
Bilgisayarlar	19,23
Tv	10,55
Telefonlar	7,77
Statik radyolar	6,34
Hesap makineleri	5,12
Kontrol cihazları	9,95
Video kaydediciler	3,86
Ses kayıt cihazları	6,14

Baskılı devreler genellikle, tek yüzlü esnek baskılı devreler, çift yüzlü esnek baskılı devreler ve çok katlı baskılı devreler olmak üzere üretilmektedirler. Üretim amacına bağlı olarak çift katmanlı baskılı devrelerde plastik olarak epoksi reçineler kullanılırken,

çok katmanlı baskını devrelerde buna ilave olarak siyanat esterleri kullanılır. Genellikle büyük elektrikli ve elektronik ekipmanlarda yaygın olarak FR2 (FR=flame retardant-alev geciktirici) tip baskılı devreler kullanılırken, cep telefonu gibi küçük elektrikli ve elektronik ekipmanlarda ve bilgisayarlarda FR4 tipi baskılı devreler kullanılmaktadır. FR 4 tipi baskılı devreler, fiberglas ile güçlendirilmiş epoksi matriks üzerinde bromlu alev geciktiriciler ile çok katmanlı bakır katmanlardan, FR2 tipi baskılı devreler ise selüloz ile güçlendirilmiş fenolik reçinelerden oluşmaktadır [30].

Gelişmiş tipte olan baskılı devrelerde, tek katmanlı veya çift katmanlı baskılı devrelerin birbirine bakır iletken yollar ile bağlanması ile oluşmaktadır. Şekil 3.1’de çok katmanlı bir baskılı devrenin şematik çizimi verilmiştir.



Şekil 3.1 Çok katmanlı bir baskılı devrenin şematik çizimi [29]

Entegre baskılı devreler ise, baskılı devreler üzerine farklı tipte entegre devreler ve elektronik komponentlerin birleştirilmesiyle oluşturulmuş, en yüksek metal ihtiva eden baskılı devrelerdir. Aynı zamanda bu tip atık durumunda en yüksek kirletici özelliğe sahip baskılı devre türüdür.



Şekil 3.2 Şekil: Elektronik atık durumundaki baskılı devreler

### 3.1 Baskı Devrelerinin Kimyasal Bileşimi ve Fiziksel Özellikleri

Baskılı devre kartları genel olarak, metalik, plastik ve seramik malzemelerden oluşmaktadır. Ortalama olarak baskılı devre kartlarının %40'ı metallere, %30'u plastiklerden ve %30'u seramik malzemelerden oluşmaktadır [32]. Metalik kısımlar yüksek miktarda bakır, alüminyum, demir ile az miktarda altın, gümüş, paladyum içermektedir. Çizelge 3.2'de görüldüğü üzere, baskılı devre kartlarında bulunan materyaller ve kompozisyonu geniş bir aralıktadır. Bu durumun nedeni, baskılı devre kartlarının, üretim amacına göre farklı kompozisyonlarda olmasından kaynaklanmaktadır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 Baskılı devre kartlarının materyal içerikleri [32]

Materyal	Kompozisyon (%)
<b>Metal ort.%40</b>	
Cu	10-26,8
Al	1,33-4,78
Pb	0,99-4,19
Zn	0,16-2,17
Ni	0,28-2,35
Fe	1,22-8
Sn	1-5,28
Sb	0,06-0,4
Au	80-1000ppm
Pt	4,6-30ppm
Ag	110-3301ppm
Pd	10-294ppm
<b>Seramik ort.%30</b>	
SiO <sub>2</sub>	15-41,86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6-6,97
Alkali-Toprak alkali oksitler	6-9,95
Titanat, mika vb.	3
<b>Plastik ort.%30</b>	
Polietilen	9,9-16
Polipropilen	4,8
Polyester	4,8
Polivinil klorür	2,4
Naylon	0,9
Epoksi	4,8

Kullanım amacına uygun olarak, baskılı devre kartları üç ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, iletken olmayan altlıklar, altlıkların iç kısmına ya da üzerine kaplanmış iletken kısımlar ve altlıkların üst kısmına monte edilen bileşenlerdir [33].

Metalik parçalar, seramik, plastik ve fiberglas ile güçlendirilmiş plastik şeklinde bulunan, iletken olmayan altlıklara monte edilmektedir. İletkenliği sağlamak amacıyla kullanılan bakır ise, altığın içerisinde veya üzerinde işlenmiş olarak bulunmakta ve baskılı devrelerin %10 ile %26,8'lik kısmını oluşturmaktadır. Baskılı devrelerde bakırdan sonra en çok kullanılan metal ise alüminyumdur. Alüminyum, değişik formlarda yapı malzemesi olarak kullanılır. Altın, gümüş, platin ve paladyum, yüksek kimyasal stabilite ve iyi iletim özelliklerinden dolayı, kontakt parçalarında kullanılmaktadır (Çizelge 3.3). Aynı zamanda baskılı devrelerin yapılarında bulunan metallere gümüş ve kalay ince filmler şeklinde oksidasyondan korunmak amacıyla, diğer ana metaller ise elektriksel iletim özellikleri ve devrelerin birbirine bağlanmasında kullanılmaktadırlar [39]. Buna ilave olarak, örneğin kapasitörlerde Ta, entegre devre çiplerinde ve diğer parçalarda ise Ga, In, Ti, Si, Ge, As, Sb, Se ve Te kullanılmaktadır. Lehimli kısımlar, Pb ve Cd, yarı iletken parçalarda ise Ga, Si, Se ve Ge kullanılmaktadır. RoHS direktifleri doğrultusunda üretilen yeni devrelerde kurşun yerine, kalay kullanılmaktadır[32].

Çizelge 3.3 Baskılı devrelerde kullanılan elementlerin uygulama alanları [34]

Elektroteknik Uygulamalar	Elementler
Kondüktör, kontakt materyaller, yarı iletken parçalar	Be, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pd, Ag, Pt, Au, Hg
Lehimler	Sn, Pb, Bi
Dielektrikler	Ca, Sr, Ba, Ti, Mo, Ta
Yarıiletkenler	Si, Ge, Ba, Ti, Mo, Ta
İzokatörler	B, Mg
Folyolar	Al
Alev geciktiriciler	P, Cl, Br, Sb

Baskılı devre kartlarında, metalik kısımların haricinde kullanılan polimerler, laminatların yapısında ve lehimli kısımların korunmasında kullanılıp, genellikle C-H-O yapılıdır. Alev geciktiriciler ise plastik kaplamalarda kullanılmaktadır. Kaynaklı kısımlarda bulunan seramik malzemeler ise ağırlıklı olarak alümina ve silika içerip, mika, alkali ve toprak alkali oksitleri de bünyelerinde bulundurmaktadırlar.

Baskılı devre kartları, farklı kimyasal kompozisyonda ve fiziksel özellikteki materyallerden oluşmakta ve aynı zamanda atık durumdaki metal ve plastiklerin geri kazanımında hammadde kaynağıdır. Özellikle bakır, demir, alüminyum ve kıymetli metaller gibi ekonomik önem taşıyan metallerin geri kazanım işlemlerinin efektif bir şekilde uygulanabilmesi, bu metallerin fiziksel özellikleri ile yakından ilgilidir. Fiziksel

özelliklerdeki farklılıklar, mekanik geri dönüşüm sistemlerinin ana yapısını oluşturmaktadır [34]. Cevher hazırlama yöntemlerinden biri olan minerallerin yoğunluk farkına göre ayrılması, elektronik atıkların geri kazanımında da aynı prensip üzerinden uygulanmaktadır [35]. Baskılı devrelerde kullanılan metallerin farklı yoğunluk özellikleri göstermesi, yoğunluk farkına göre ayırım yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda bu metallerin gösterdikleri manyetik özellikler, manyetik ayırma yapılabilmesini de sağlamaktadır. Çizelge 3.4’de baskılı devreler içerisinde bulunan metallere ait yoğunluk özellikleri ve manyetik özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.4 Baskılı devre kartların materyal içeriklerinin yoğunluk ve elektriksel iletkenlik ve manyetik duyarlılık özellikleri [34]

Materyal	Yoğunluk ( $\rho$ ) ( $\times 10^3 \text{kgm}^{-3}$ )	Elektriksel İletkenlik( $\sigma$ ) ( $\times 10^6 \text{m}^{-1} \Omega^{-1}$ )	Manyetik Duyarlılık ( $10^{-6} \text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$ )
Bakır	8,93	59	Diyamanyetik (-5,46)
Alüminyum	2,7	35	Paramanyetik (+16,5)
Paladyum	12,2	9,5	Paramanyetik (+540)
Gümüş	10,49	68	Diyamanyetik (-19,5)
Çinko	6,92	17,4	Diyamanyetik
Altın	19,32	41	Diyamanyetik (-28)
Krom	7,19	7,74	Paramanyetik (+167)
Nikel	8,9	12,5	Ferromanyetik
Kalay	7,29	8,8	Paramanyetik
Kurşun	11,43	5,5	Diyamanyetik (-23)
Alaşımli Çelik	7,7	0,7	Ferromanyetik

Partiküllerin fiziksel özelliklerine göre birbirinden ayrılmasını etkileyen üç ana faktör bulunmaktadır. Bunlar;

- Partikül Boyutu; serbestleşme derecesini etkiler. Genellikle, büyük boyutlu parçalar, ayırma proseslerinde daha yüksek serbestleşme sağlar.
- Partikül Şekli; Mekanik işlemler sırasında uygulanan kuvvet, hız ve kullanılacak cihazın konfigürasyonunu etkiler.
- Bağlantı Şekli; serbestleşme derecesini etkiler [36].

Partikül boyutu, şekli ve serbestleşme derecesi mekanik geri dönüşüm prosesi için çok önemli bir rol taşımaktadır. Partikül şekli, ayırma prosesleri üzerinde, proseslerin efektif olarak işleyebilmesini sağlayan ana faktörlerini etkilemektedir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5 Partikül şeklinin ayırma proseslerine etkisi [37]

Ayırma Prosesi	Partikül Şeklinin Etkisi
Yoğunluk Farkı İle Ayırma	Ayrılma hızı, ayırma verimi
Manyetik Ayırma	Demanyetizasyon faktörü, manyetik kuvvet
Elektrostatik Ayırma	Elektrostatik kuvvet
Eddy Akımları İle Ayırma	Lorentz Kuvveti

Efektif bir ayırma tekniği seçmek için parça boyutu özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Cui ve Fossberg tarafından daha önce laboratuvar ölçekli yapılan bir çalışmada baskı devresi hurdalarının serbestleşme derecelerinin belirlenebilmesi için iki kez kırma işlemi yapılmıştır. Bu çalışmaya göre, ikinci kırma işlemi sonrası numunelerin tane boyutunun yaklaşık 5mm altındaki bir değere indiğini belirtilmektedir. Tane boyutunun 2mm. ve ya daha büyük olduğu durumlarda bakırın serbestleşmesi zayıf özellik gösterirken, ferromanyetiklerin ise 16mm.den daha büyük tane boyutlarında zayıf serbestleşme gösterdiği görülmektedir. Alüminyum ise 7mm. ve daha büyük değerlerde zayıf serbestleşme derecesine sahip olduğu görülmektedir [34].

Endüstriyel uygulamalarda (Çizelge 3.6) maksimum serbestleşme için 5mm veya 10 mm tane boyutuna kadar kırma işlemi yapılmaktadır [34].

Çizelge 3.6 Baskılı devre kartları atıklarının serbestleşme dereceleri [35]

Boyut aralığı	Ağırlık (%)	Serbestleşme Derecesi (%)		
		Ferromanyetikler	Al	Cu
16	19,85	8,7	100	2,8
-6,5	16,91	80	100	15,4
-2,8	15	95	*	48,6
-1,95	12,71	95,4	*	62,5
-3,05	16,32	99,2	*	99
-1,1	10,46	100	*	99
-0,3	3,54	100	*	100
-0,3	5,21	100	*	100
Toplam	100	77		53,5

### **BASKILI DEVRE KARTLARININ GERİ KAZANIM YÖNTEMLERİ**

Hızlı teknolojik gelişmeler ve artan elektronik üretimi, her geçen yıl artan miktarda elektronik atık açığa çıkarmaktadır. Ortalama olarak, bir bilgisayarın kullanım ömrü 3 ile 5 yıl arasında değişirken, cep telefonlarında ise bu rakam sadece 1 yıldır. Her yıl, 100 milyon cep telefonu ve 17 milyon bilgisayar, eski teknolojik özellikler ve arıza nedenlerinden dolayı atık konumuna çıkmaktadır [30]. Atık haldeki elektrikli ve elektronik ekipmanların %3 'ü baskılı devre kartlarından oluşmaktadır [38]. Özellikle baskılı devre kartlarının geri kazanımı içerdikleri bakır, demir, alüminyum, kıymetli metaller vb. metallerden global bir önem taşımaktadır. Örneğin bir ton bilgisayar hurdasındaki altın miktarı, 17 ton cevherin işlenmesi sonucu elde edilen altın kadardır [30]. Diğer katı atıkların aksine, atık PCB'ler eğer uygun geri dönüşüm işlemlerine tabi tutulmazsalar, içerlerinde buldukları ağır metaller, zararlı bileşenler vb. yapılardan dolayı, büyük bir çevre kirliliğine neden olmaktadır [32].

Metallerin geri kazanım süreçleri, ekonomik değeri bulunan demir ve demir dışı metaller ile kıymetli metallerin (Au, Ag, Pd, vb.) kazanılması, çevresel sorun oluşturan plastik malzemelerin kazanılması ve buna bağlı olarak atık miktarının azalması gibi birçok katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda, geri kazanım süreçleri sonucunda elde edilen ürünlerin birincil kaynakların yerine kullanımı, bu kaynakların tüketim hızlarının azalmasını sağlamakta ve enerji kullanımını da sınırlamaktadır. Çizelge 4.1'de çeşitli metallerin, geri dönüştürülmesi sonucu kullanımları ile birincil kaynaklardan kullanımı sırasındaki enerji kazanımın değerleri verilmiştir.



Çizelge 4.1 Çeşitli metallerin geri dönüşüm işlemleri sonucunda enerji kazanımı [34]

Materyal	Enerji Kazanımı (%)
Alüminyum	95
Bakır	85
Demir-Çelik	74
Kurşun	65
Çinko	60
Plastikler	>80

Atık durumdaki PCB'lerin geri kazanım süreçleri üç ana kategoride incelenmektedir. Bunlar;

- Demontaj İşlemleri
- Mekanik ve Fiziksel İşlemler
- Pirometalurjik, Hidrometalurjik ve Elektrometalurjik İşlemler

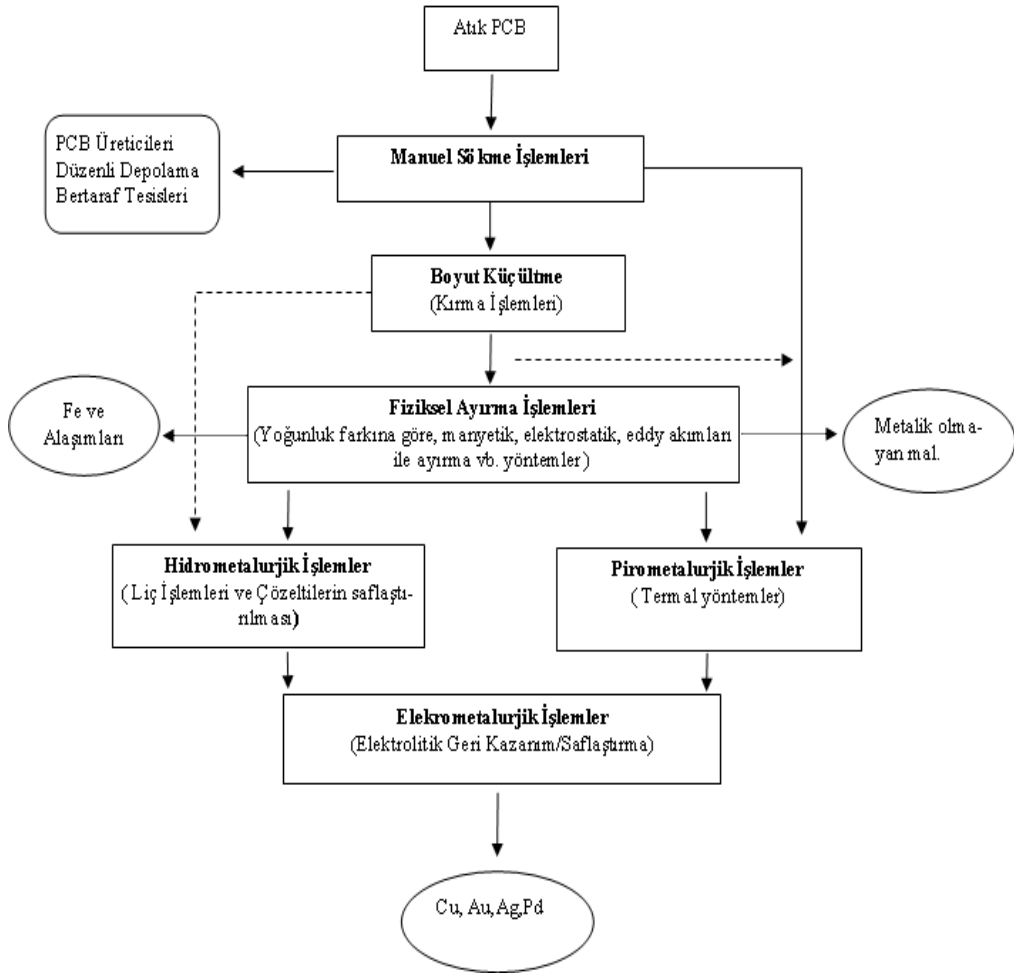
Atık durumdaki PCB'lerin, PCB Üreticileri, kişisel ve ticari son kullanıcılar ve demontaj işlemlerini gerçekleştiren firmalar olmak üzere üç ana kaynağı bulunmaktadır. PCB üreticileri ve kişisel ve ticari son kullanıcılardan gelen ürünler tekrar kullanılabilir parçaların ayrılması ve bu parçaların PCB üreticilerine tekrar gönderilebilmesi amacıyla El ile Demontaj ya da mekanik demontaj işlemleri uygulanmaktadır. İşlemler sırasında açığa çıkan zararlı bileşenler, bertaraf ve düzenli depolama tesislerine gönderilmekte ve bu şekilde zararlı bileşenlerin kompozisyon içerisinde bulunması engellenmektedir [39].

Demontaj işlemleri sonrası, yapılan mekanik ve fiziksel işlemler sonucu alüminyum ve demir gibi metaller geri kazanılırken, bunun dışında kalan kısımlar düzenli depolamaya, metal ve kıymetli metal içeren kısımlar ise rafinasyon pirometalurjik, hidrometalurjik ve elektrometalurjik yöntemler kullanılarak, metal kazanımları sağlanmaktadır.

Atık durumdaki PCB'lerin demontaj işlemleri sonucunda yaklaşık %85'i herhangi bir işleme tabi tutulmadan düzenli depolama yapılırken, bu atıklardan metal geri kazanım oranları ise sadece %15'dir [40].

En genel şekliyle geri kazanım süreçleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Uygulanacak yöntemin seçimi, malzeme kompozisyonu ve miktarına göre yapılır. Düşük kıymetli

metal içeriği olan atıklar, kompozisyonun yükseltilmesi amacıyla mekanik ön işlemlere tabi tutulurken, yüksek seviyede kıymetli metal içeren atıklar, direkt olarak Pirometalurjik ve Hidrometalurjik ve ardından uygulanan Elektrometalurjik yöntemler ile metal geri kazanımı sağlanmış olur. İşlemlerin türünü belirleyen ana faktör içerdikleri kıymetli metal miktarlarıdır [36].



Şekil 4.1 Baskılı devre kartlarının geri kazanım süreçlerinin şematik çizimi [4]

#### 4.1 Ön İşlemler

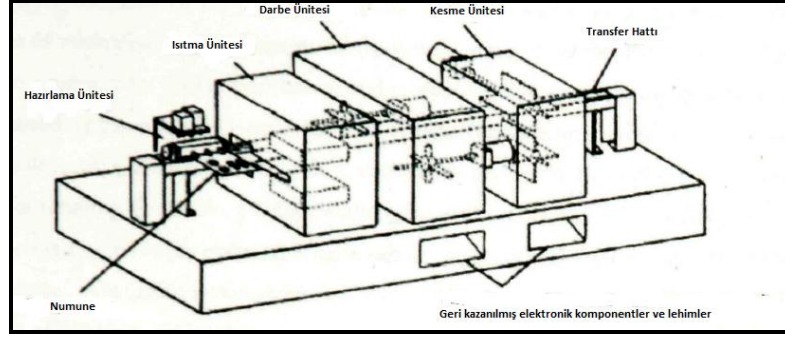
Demontaj işlemleri, tekrar kullanılabilir komponentlerin ve diğer zararlı komponentlerin yapıdan ayrılması amacıyla el ile ya da mekanik olarak gerçekleştirilen işlemlerdir. Baskılı devreler üzerindeki elektronik komponentler, çok çeşitli bağlantılar vasıtasıyla yüzeye monte edilmektedir. Bu bağlantılar, soket bağlantıları, PCB'ye alt yüzeyden yapılan lehimler (Through-hole Device-THD), PCB yüzeyine doğrudan yapılan montajlar (Surface mounted device- SMD), vidalı bağlantılar ve perçinlerdir [36]. Bu bağlantıların kırılması ve yapıdan uzaklaştırılması amacıyla temelde iki ana işlem uygulanmaktadır.

- El ile demontaj: Manuel yöntemler ile PCB'lerin üzerlerindeki zararlı bileşenler ve tekrar kullanılabilir bileşenler ayrılır ve işlem sırasında aynı zamanda atıklar sınıflandırılmaktadır (Şekil 4.2)



Şekil 4.2 Demontaj işlemi sonrası PCB üzerinden çıkartılan parçalar ve nihai atık ürün

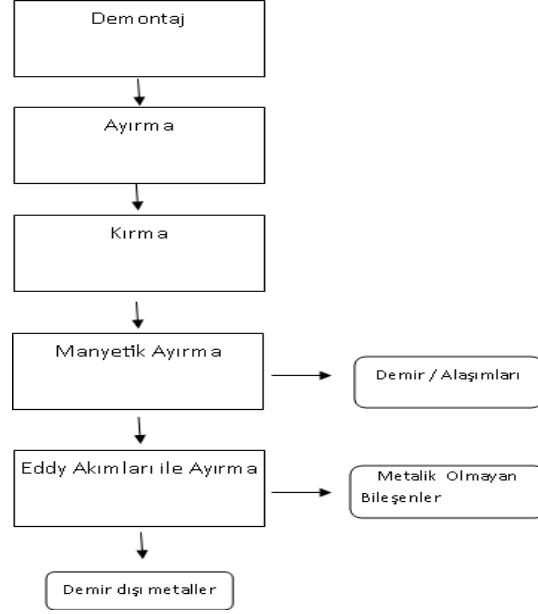
- Mekanik Demontaj: Mekanik yöntemler kullanılarak yapılan ayırma işlemleridir. Otomatik veya yarı otomatik sistemler kullanılarak uygulanmaktadır. Yarı-otomatik uygulamalarda, ayırma kuvvet ve sıcaklık etkisiyle gerçekleştirilmektedir. Hazırlama ünitesi vasıtasıyla beslenen ürünler, ısıtma ünitesine transfer edilir ve yaklaşık 230°C arasında gerçekleştirilen işlemlerde lehimli kısımların ergime ile birbirinden ayrılır. Daha sonra uygulanan darbe kuvveti ve kesme işlemleri sonucunda cihazın alt kısmında geri kazanılmış metaller ve lehimli bileşenler elde edilir (Şekil 4.3). Ancak, uygulanan sıcaklık nedeniyle piroliz gerçekleşebileceğinden , dioksin oluşumu açığa çıkabilmektedir [26]. SMD'lerin bağlantı noktaları lehimle birleştirildiğinden bu yöntemle kolaylıkla ayrılabilirken, THD, vidalı bağlantılar ve perçinlerin ayrılması için diğer mekanik işlemlere gereksinim duyulmaktadır [42].



Şekil 4.3 Yarı-mekanik ayırma ünitesi şematik çizimi [42]

## 4.2 Mekanik ve Fiziksel Ön İşlemler

Elektronik atıkların farklı komponentlerinin sahip oldukları fiziksel özellikler, bu farklılıklardan yararlanılarak metal ve plastiklerin ayrılmasını mümkün kılabilir. Mekanik işlemler, öncelikle kırıcılar yardımıyla boyut küçültme ile başlar ve sırasıyla metal ve metal olmayan fraksiyonların çeşitli yöntemler ile birbirlerinden ayrılması şeklinde devam eder [16]. Fiziksel ayırma yöntemleri düşük işletme maliyetleri olması açısından önemlidirler ancak işlemler sırasında %10 ile %35 arasında işlemler sırasında metal kayıpları olabilmektedir. Kayıpların nedeni, kırma işlemleri sonucu uygun olmayan tane boyutlarında metallerin plastik komponentlerden ayrılmaması ve bunun sonucunda efektif bir ayırım işleminin gerçekleşmemesidir. Endüstriyel uygulamalarda minimum metal kaybının sağlanabilmesi amacıyla, fiziksel yöntemlerin, genellikle pirometalurjik ve hidrometalurjik işlemler öncesi sadece ön ayırma işlemi olarak uygulanmaktadır. Aynı zamanda işlemler sırasında oluşan sıcaklık nedeniyle açığa çıkabilecek olan zararlı gazlar da fiziksel işlemlerin optimum seviyede yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır [4]. En genel şekliyle mekanik işlemlere ait akış diyagramı Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Mekanik ve fiziksel işlemler genel akış diyagramı

#### 4.2.1 Kırma İşlemleri

Baskılı devrelere kırma işlemi, tane boyutunun küçültülmesi ve serbestleşmenin sağlanması amacıyla, uygun tane boyutuna göre bir veya birkaç kez çeşitli cihazlar kullanılarak uygulanan boyut küçültme işlemleridir.

İlk kademe kırma işlemi “Kesici (Shredder)” olarak adlandırılan cihazlar ile uygulanmaktadır. Bu cihazlar, birbirine ters yönde dönen, çapları 250-800 mm arasında değişen iki merdanelen oluşmaktadır. Bu merdaneler üzerinde kesme işlemini gerçekleştiren ve makinanın türüne göre sayısı değişen bıçaklar bulunmaktadır [50]. Merdanelerin birbiriyle ters yönde dönüşleri sırasında, bıçaklar yardımıyla baskılı devreler kesilir ve işlem sonucunda yaklaşık 1-2cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip parçalar elde edilir [16].

Bir sonraki işlemler için gerekli olan metal ayrımı ve tane serbestleşmesinin sağlanabilmesi için, kesicilerden çıkan ürünlerin tekrar kırma işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Bu amaçla uygulanan ikinci kırma işlemi çekiçli kırıcılar ile gerçekleştirilmektedir. Elde edilen ürünlerin tane boyutları 0,3mm ile 3mm arasında değişiklik göstermektedir [44].

Yöntemin en önemli dezavantajı PCB 'lerin karakteristik özellikleri olan yassılaşıma, tokluk, metaller ve diğer materyaller arasındaki kohezyon kuvvetleri nedeniyle kırma

işlemleri sırasında yükselen sıcaklık bromlu bileşenleri bozunması ve toksik gazlar açığa çıkabilmesidir [11].

#### **4.2.2 Manyetik Ayrıma İşlemleri**

Baskılı devreler içerisinde bulunan metallerin farklı manyetik duyarlılıklarından faydalanarak, manyetik seperatörler ile gerçekleştirilen işlemler bütünüdür. Ferromanyetik metallerin, demir-dışı metaller ve diğer manyetik olmayan atıkların geri kazanımı için düşük şiddetli tamburlu manyetik ayırıcılar kullanılmaktadır. Boyut küçültme sonrası elde edilen ürünler besleyici veya bant vasıtası ile düzgün şekilde tambur üzerine beslenir. Manyetik olan taneler tambur yüzeyine yapışarak tamburla birlikte hareket ederler. Manyetik olmayan taneler, yerçekimi ve merkez kaç kuvvetleri etkisiyle parabolik bir yörünge ile düşerler. Yan yana olan mıknatıs kutupları farklı olduğundan, tambura yapışan taneler dönerek hareket ederler ve aralarına sıkışan manyetik olmayan tanelerin ayrılarak düşmesini sağlarlar. Tamburla birlikte hareket eden taneler manyetik alandan çıktıktan sonra düşerek demir içeren metalik kısımları oluşturmaktadırlar.

#### **4.2.3 Yoğunluk Farkına Göre Ayırma**

Farklı akışkan ortamlar içerisinde, malzemelerin sahip olduğu özgül ağırlıklarının farklılıkları kullanılarak birbirlerinden ayrılması işlemleridir. Metal ve metalik olmayan fraksiyonlar bu yöntem ile birbirinden ayrılabilir. Yoğunluk ayırmada kullanılan ana faktör olmasına rağmen, partiküllerin akışkan ortam içerisindeki hareketleri sadece partikül yoğunluğuna bağlı değildir aynı zamanda partikül boyutu ve şekline de bağlıdır. Bu nedenle homojen tane boyutu ve şekli oluşturulması işlemlerin verimliliği açısından önemli parametrelerdir. İşlemler sonucunda elde edilen ürünler;

- Ağır partiküller; metal oranı yüksek ürünler
- Hafif partiküller: Plastik, kablo vb. ürünler

şeklinde. Yöntemler genellikle hava ve sıvı ortam içerisinde gerçekleştirilmektedir. Cihaza beslenen girdilerden küçük ve hafif olanlar, havanın etkisiyle, hava verilen

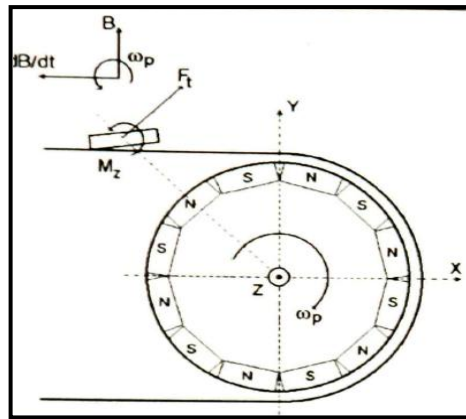
yönün aksinde hareket etmeye başlarken, ağır parçalar ise düşer ve bu şekilde ağır ve hafif parçalar birbirlerinden ayrılmaktadırlar [43].

#### 4.2.4 Elektrostatik Ayırma İşlemleri

PCB'lerin sahip olduğu materyallerin sahip oldukları farklı elektrik iletkenliği özellikleri ile demirdışı materyallerin, iletken olmayan materyallerden ayrılması için kullanılan ayırma yöntemleridir. Elektrik iletkenlik temelli mekanik ayırım prosesi üç ana teknik üzerinden uygulanmaktadır. Bunlar;

- Eddy akımları ile ayırım,
- Korona elektrostatik ayırım
- Triboelektrik ayırım,

şeklindedir. Eddy Akımları ile Ayırım Yöntemi, genellikle bakır, alüminyum, kurşun ve çinkonun ayrılması sırasında kullanılır. Seperatöre uygulanan voltajla birlikte Eddy akımları oluşmakta bunun sonucunda manyetik bir alan açığa çıkmaktadır. Üstten dönen bir konveyör üzerine beslenen materyaller, oluşan manyetik alanın etkisiyle tambur üzerine çekilir (Şekil 4.5). Elektriksel iletkenliği zayıf olan diğer materyaller ise uygulanan bu kuvvetten etkilenmez ve düşerek toplama ünitesinde biriktirilirlir. Sistemin dezavantajı 5 mm'den daha küçük tane boyutlarında çalışmanın verimsiz olması ve yatırım maliyetlerinin yüksek olmasıdır [42].



Şekil 4.5 Üstten beslemeli Eddy akımı ayırıcısı şematik çizimi [49]

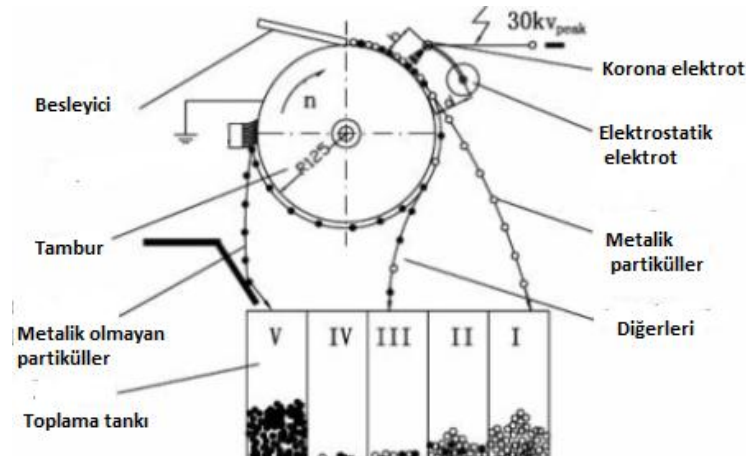
Metallerin sahip oldukları elektriksel iletkenlik ve yoğunluklarının oranı hangi metalin birbirinden ayrılacağını belirleyen ana faktördür. Bu oranın en yüksek olduğu değer

Çizelge 4.2'de gösterildiği üzere alüminyumdur ve bu proses alüminyumun ayrımı için en efektif özellikleri göstermektedir [43].

Çizelge 4.2 Ayırmanın bir faktörü olarak demirdışı metallerin iletkenlik ve yoğunluk oranları

Metal	Elektriksel İletkenlik ( $\sigma$ )( $\times 10^6 \text{ m}^{-1} \Omega^{-1}$ )	Yoğunluk ( $\rho$ ) ( $\times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ )	Elektriksel İletkenlik/Yoğunluk ( $\sigma$ )/ ( $\rho$ )
Alüminyum	0,35	2,7	13
Bakır	0,59	8,9	6,7
Gümüş	0,63	10,5	6
Çinko	0,17	7,1	2,4
Kalay	0,09	7,3	1,2
Kurşun	0,05	11,3	0,4

Tane boyutu 0,1mm ile 0,5 arasında olan partiküllerin birbirinden ayrılması sırasında kullanılan bir diğer elektrostatik ayırma yöntemi ise Korona elektrostatik ayırıcılar ile uygulanmaktadır. Partiküller, pozitif ve negatif yükle yüklenmiş elektrotlar arasından geçerken, korona elektrostatik alan içerisinde oluşan iyon bombardımanı ile şarj olurlar. Pozitif yükle yüklenmiş olan partiküller tambur üzerine toplanırken, negatif yükle yüklenmiş olanlar ise elektrotların yüzeyinde toplanmakta ve daha sonra bu yüzeylerden sıyrılmaktadır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Korona elektrostatik seperatörü şematik çizimi [44]

Triboelektrik ayırmada tane boyutu 5mm'den küçük olan partiküllerdeki plastiklerin sahip olduğu farklı hacim özdirençler ve özgül ağırlık özelliklerinden yararlanılmaktadır. Plastik atıklar üzerine yapılan çalışmalar, triboelektrik elektrostatik ayırmanın parçacık



şeklinde bağımsız olarak gerçekleştirilebilmesi, düşük enerji tüketimi ve yüksek işlem hacmi gibi avantajlara sahip olduğunu göstermiştir [41].

Elektrostatik ayırma ve manyetik ayırma yöntemlerinin tane boyutu ve uygulanabildiği materyaller Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.3 Elektrostatik ayırma yöntemleri [11]

Ayırma Yöntemleri	Ayırma Kriteri	Malzeme Türü	Ayırma Tane Boyutu
Eddy Akımları ile Ayırım	Elektrik iletkenliği, yoğunluk	Demirdışı metaller ve metalik olmayan bileşenlerin ayırımı	>5mm
Korona Elektrostatik Ayırım	Elektrik İletkenliği	Metal ve metal olmayan bileşenlerin ayırımı	0,1-5mm (tabakalı yapılarda 10mm)
Triboelektrik Ayırım	Dielektrik sabiti	Plastiklerin ayırımı	<5-10mm

Tüm mekanik ve fiziksel işlemler göz önünde bulundurulduğunda, ön işlemler, teknik olarak sınırlanmakta ve metal kayıpları oluşmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda kesme ve ayırma işlemlerinden elde edilen ürünlerin saflıkları yüksek değildir. Uygulan her yöntemin sahip olduğu fiziksel özellikler, partikül boyutu, partikül şekli vb. özelliklere de bağlı olduğundan elde edilen ürünler istenen bu özelliklerden etkilenecek istenmeyen çıktılarının içerisinde bulunabilir. Örneğin, baskılı devreler içerisinde bulunan kıymetli metaller, plastik kısımlarla güçlü bir şekilde bağlanmıştır. Mekanik işlemler sırasında, oluşan toz partiküllerden dolayı özellikle kıymetli metal miktarlarında kayıp olabilmektedir [44]. Bu kayıplar, giriş materyallerinin yaklaşık %20'sini etkilemekte ve sistemlerin toplam verimi kıymetli metaller için %77,5'dir. Bu nedenle metal kayıplarını minimuma indirmek ve özellikle kıymetli metallerin geri kazanım verimlerinin artırılması için, işlemler sonrasında pirometalurjik/termal ya da hidrometalurjik yöntemlerin kullanılması zorunlu hale gelmektedir [46].

### **4.3 Pirometalurjik Geri Kazanım Yöntemleri**

Pirometalurjik proses, elektronik atıklarda bulunan demir içermeyen metallerin geri kazanımı amacıyla, çeşitli ergitme ocakları kullanılarak, yüksek sıcaklıklarda gaz fazında oluşan reaksiyonlar ile gaz fazda oldukça yüksek sıcaklıktaki reaksiyonlar ile gerçekleştirilen, ergitme, sinterleme ve droslama işlemlerini içeren yöntemlerin bütünüdür. Özellikle son 20 yıl içerisinde, demir dışı metallerden bakır ve kurşunun ile kıymetli metallerin geri kazanımında yaygın olarak kullanılmaktadır [45]. Endüstriyel uygulamalarda birçok farklı yöntem kullanılırken, uygulanan ana prensip, proses sırasında, kırılmış atıklar, fırın içerisine şarj edilerek yakılır ya da ergiyik banyosu oluşturularak plastikler giderilir ve bazı metal oksitler ile refrakter oksitler cüruf fazında sistemden uzaklaştırılır [47].

Pirometalurjik yöntemler geleneksel yöntemler ve yeni gelişen uygulamalar şeklinde iki ana başlık altında incelenirse, pratikte uygulanan yöntemlerden geleneksel yöntemler, bakır ya da kurşun geri kazanımı sırasında sisteme ilave edilen atıklar içerisindeki kıymetli metallerin geri kazanımı şeklindedir. Ergitme reaksiyonları sırasında, düşük miktardaki metal ve kıymetli metal konsantrasyonunu yapı içerisinde toplayabilmek için bakır veya kurşun kullanılır ve bu şekilde homojen kimyasal özellik göstermeyen alaşımlar oluşturulur [48]. Geleneksel yöntemlerin negatif özelliklerini bertaraf etmek ve plastiklerin geri kazanımı, enerjinin korunumunun sağlanabilmesi amacıyla Yeni geliştirilen yöntemler ise, Plazma Ark Teknolojisi ile ergitme, plastiklerden enerji geri kazanımı amacıyla uygulanan Piroliz, bir ön hazırlık işlemi olarak Yakma, Üstten Üfleme Prosesi olarak sınıflandırılabilir.

#### **4.3.1 Geleneksel Yöntemler**

##### **4.3.1.1 Bakır İle Geri Kazanımı Yöntemi**

Pirometalurjik yöntemler ile gerçekleştirilen geleneksel bakır geri kazanımı sırasında ağırlıkça %5-40 oranında bakır içeren elektronik hurdalar, konversitaj işlemleri sırasında sisteme dahil edilmektedir. Yaklaşık 1250°C sıcaklıkta, konverter içerisinde hava veya %39 oksijenle zenginleştirilmiş havanın etkisiyle Cu oksitlenir, yapıda kalan Fe ise cüruf fazına ayrılır, Cu oranı %95'e çıkartılır. Elde edilen blister bakır, diğer hurda

bakırlar ile birlikte Anot Fırınlarda tekrar redüklenir, anot bakır olarak dökülür ve %99,1 saflıkta bakır içeriğine ulaşılır. İndirgenme tepkimesinin kok kömürü, ahşap vb. hidrokarbon içeren indirgeyicilerin yanı sıra, plastikler de indirgeyici özellik göstermektedir [47].

Yapıda bulunan Pb, Fe ve Zn, ortamdaki havanın etkisiyle yükseltgenerek oksitli bileşiklere dönüştürülür ve silika bazlı cüruf içerisinde toplanarak ana yapıdan ayrılırlar. Ana yapının %0,9'luk kısmı, Au, Pd, Pt gibi kıymetli metaller ile Se, Te ve Ni uygun prosesler ile geri kazanılabilecek metalleri içermektedir [47].

Bu fırınlarda gerçekleştirilen işlemlerin verimliliğini etkileyen ana parametre başlangıç konsantrasyonların homojen özellikte olmasıdır. Çünkü hurda bakır içerisinde bulun çinko, kurşun, kalay ve diğer metaller ile elektronik hurdalara ait şarj malzemeleri, anot bakırın ve çıkan cürufun özelliklerini belirlemektedir. Aynı zamanda, Plastiklerin işlemler sırasında bozunarak, enerji açığa çıkarması enerji maliyetlerinin azaltılmasında önemli bir etkidir [49].

İşlemler sırasında kullanılan elektronik atıklar içerisindeki kıymetli metaller, anot bakır içerisinde toplanmaktadır. Bakır saflığının yükseltilmesi ve anot bakır içerisinde toplanmış olarak bulunan kıymetli metallerin bakır bünyesinden ayrılabilmesi amacıyla, sülfürik asit (  $H_2SO_4$  ) içeren çözeltiler yardımıyla elektroliz işlemleri uygulanmaktadır. Elektroliz sırasında uygulanan voltaj ve buna bağlı olarak oluşan akım, anot bakırdan bakırın çözünerek bakır sülfat içeren çözeltiliye ve daha sonra da katot yüzeyinde toplanmasını sağlarken, bakırdan daha elektronegatif olan kıymetli metaller, çözünmeyerek, elektroliz hücrelerinin tabanlarında anot çamuru olarak toplanmaktadır. Katot yüzeyinde toplanan bakırın saflık derecesi %99,99 'dur.

Elde edilen anot çamuru, içerisinde bulundurduğu kıymetli metallerin geri kazanımı amacıyla, basınç altında liç işlemine tabi tutulur ve kalan kısım çeşitli cüruflaştırıcılar ile ergitilir. Elde edilen sıvı metal anot şeklinde dökülerek, uygun bir çözelti yardımıyla gümüş elektroliz işlemine tabi tutulur. Elektroliz sonucunda katot yüzeyinde saf gümüş toplanır, elektroliz hücresinin tabanında altın, platin ve paladyum içeren anot çamuru birikir. Bu şekilde gümüş, altın ve diğer kıymetli metallerden geri kazanılmış olmaktadır.

İşleme miktarları incelendiğinde, örneğin Kanada Quebec Rafinerisinde, 100000 ton elektronik hürdanın, bakır konsantresinden saf bakır kazanımı sırasında işleme hurda malzeme olarak ilave edilmesi ile geri kazanıldığını ve bu rakamın bakır konsantresine göre toplam girdi miktarının %14'lük kısmını oluşturduğu belirtilmiştir [47].

İşlemler sırasında kullanılan enerjinin incelenmesi bakımından daha önce yapılan bir çalışma Belçika Umicore Rafinerisinde 2004 yılında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada plastik içeriği zengin materyallerin, enerji üzerine etkisi incelenmektedir. Sadece %4,5 kok içeren plastik içermeyen besleme ile %6 plastik içeren, %1 kok içeren besleme birbirleriyle kıyaslanmıştır. Çalışmalar sonucunda plastik içeren besleme ile yapılan ergitme işlemlerinde kullanılan enerji miktarının, plastik kullanılmadan yapılan besleme sonucuna göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. PCB'lerin ergitilmesi sırasında kullanılan enerji miktarı 1500 kJ/kg iken saflaştırma işlemleri için devam eden proseslerde 6500 kJ/kg enerji tüketilmektedir. Yapıda bulunan plastiklerin yanmaları sonucu açığa çıkan enerji miktarı ise 9600 kJ/kg'dır ve geri kazanım için gerekli olan enerji ihtiyacını karşılamaktadır [50]. Aynı zamanda, plastiklerin sisteme ilave edilmesi sonucu, metal geri kazanım oranları ve proses parametrelerinin işlemler sırasında negatif yönde bir etki oluşturmadığı tespit edilmiştir [47].

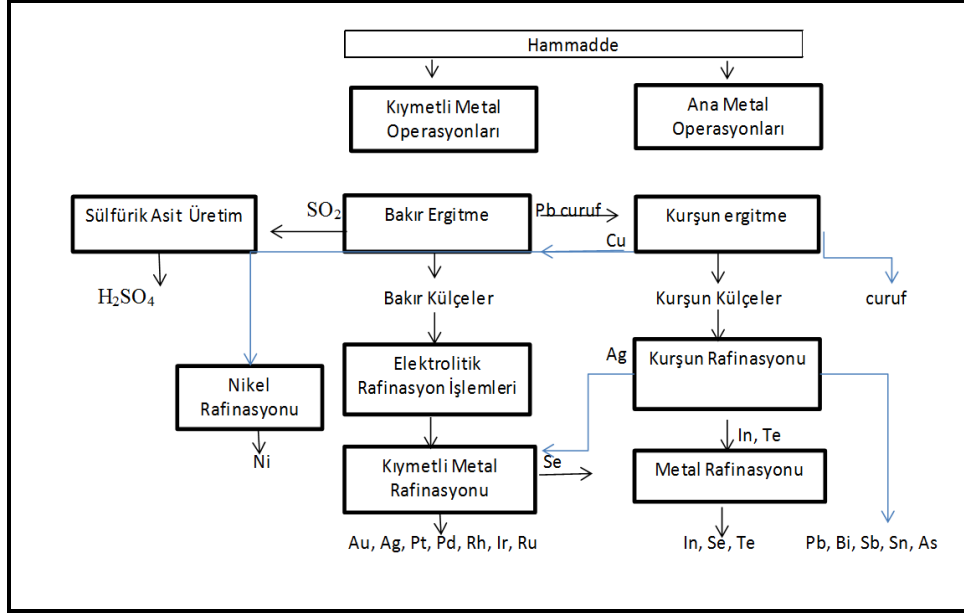
Ergitme işlemlerinin yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesinden dolayı, yöntemin sahip olduğu bazı çevresel kirlenici etkiler bulunmaktadır. Örneğin katı kirleniciler incelendiğinde, açığa çıkan kül ve cürüflardan dolayı atık oluşumu ve buna bağlı olarak atık miktarının artması, geri kazanımdaki atık miktarının azaltılması yönündeki çalışmalara olumsuz etki oluşturmaktadır. Kirleniciler gaz fazında incelendiğinde ise ergitme fırınları içerisindeki reaksiyonlar sırasında açığa çıkan CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> nedeniyle oluşabilecek küresel ısınma, atmosferdeki asit konsantrasyonunun artması, fotokimyasal kirlenicilerin açığa çıkması önemli bir çevresel etkidir [36]. Ancak yöntem birincil kaynaklardan bakır eldesine göre kıyaslandığında, aynı miktardaki metallerin üretimleri sırasında açığa çıkan CO<sub>2</sub> emisyonunda yaklaşık olarak %80 oranında azalma görülmektedir [50].

#### 4.3.1.2 Kurşun İle Geri Kazanım Yöntemi

Düşük bakır konsantrasyonuna sahip elektronik atıkların geri kazanım işlemleri, “Kaldo Prosesi” ile gerçekleştirilmektedir. Kurşun konsantresi, elektronik atıklar ve redükleyiciler Kaldo fırınlarına beslenerek ergitme işlemi gerçekleştirilmektedir. Fırın içerisine hava üfleme esasına dayanan ve böylece yüksek karıştırma etkisi yaratılan banyo içinde ergitme ve redüksiyon olayları gerçekleşir. İlk adımda konsantre oksitlenir ve yüksek Pb içerikli curuf üretilir. Bu curuf sürekli olarak fırından alınır ve ikinci fırında redüklenir. İşlem sonucunda kurşun bileşikleri indirgenerek metalik kurşun oluşur ve yapıda bulunan yabancı materyaller yükseltgenerek cüruf fazını oluşturmaktadır.

Ergitme sonrası elde edilen cüruf Pb, Sb, In, CaO, SiO<sub>2</sub> ve FeO içermektedir. Yapıdaki kurşunun geri kazanımı için, Kurşun Ergitme fırınlarında tekrar ergitilir. Bakır alaşımları şeklinde bulunan faz ise Cu, Au, Ag, Pd, Se, Sn, Ni, Zn içeren kısımlar, tekrar bakır geri kazanımında konversitaj işlemine tabi tutularak, bakır ve diğer kıymetli metaller geri kazanılmaktadır. İşlemler sırasında baca küllerinde Pb, Sb, In bulunabilmektedir. Bu nedenle, emisyonlar içerisinde oluşan katı partiküller filtreleme yapılarak biriktirilir ve kurşun geri kazanımı için tekrar fırına yüklenir [47].

İşlemlere ait örnek bir yöntem Belçika’daki Umicore Rafinerisinde uygulanmaktadır (Şekil 4.7). İşlemlerdeki ilk basamak Kıymetli Metal Operasyonları ( Precious Metal Operations-PMO )olarak adlandırılmış olan kıymetli metallerin ortak bir fazda toplanması amacıyla IsaSmelt fırınlarında yapılan ergitme işlemidir. Plastik ve diğer organik bileşenler, redükleyici olarak fırına yüklenirken aynı zamanda da enerji kaynağı oluşturmaktadırlar. Ergitme sonrası elde edilen metalik faz, kıymetli metalleri içerirken, diğer metaller ise kurşun içeren cürufta toplanmaktadır. Curuf fazı daha sonra Ana Metal Operasyonlarında ( Base Metal Operations-BMO) işleme tabi tutulmaktadır. Elde edilen metalik bakır külçeleri, bakır ve kıymetli metallerin geri kazanımı amacıyla hidrometalurjik yöntemler uygulanmaktadır. Ana metal operasyonlarında ilk işlem kurşun yüksek fırınında oksitlenmiş olan kurşunun redüklenmesi amacıyla yapılan ergitme işlemidir. Ergitme sonrası kurşun külçeler, nikel speiss ve bakır mat elde edilir. Bakır mat içerdiği kıymetli metallerden dolayı tekrar ergitme operasyonlarına gönderilirken, kurşun ise Harris Prosesi ile saflaştırılmaktadır [51].



Şekil 4.7 Umicore Rafinerisi metal rafinasyonu akış şeması [50]

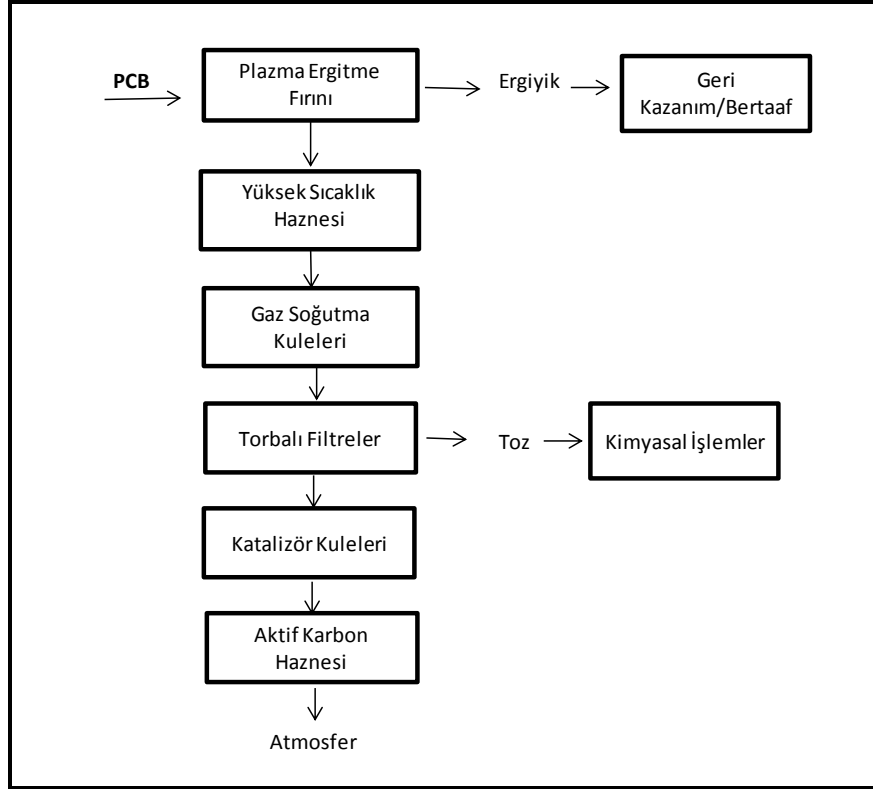
Geleneksel pirometalurjik yöntemler, son yıllarda elektronik ekipmanlardan değerli metal geri kazanımı için endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olan bir yöntem olmasına rağmen, bazı dezavantajları bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen işlemler nedeniyle, PCB 'lerde bulunan alev geciktiriciler bozunarak zararlı dioksin ve furan bileşiklerinin oluşmasına neden olabilmektedir. Yöntemlerin uygulanması sırasında oluşan gaz emisyonların otomatik kontrolü ve uygun gaz arıtma sistemleri ile bu problemin önüne geçilebilmektedir. Aynı zamanda ergitme işlemleri sırasında alüminyum ve demir gibi metaller cüruf fazına geçerek metal kayıpları oluşmaktadır. Atıkların yapısında bulunan seramik malzemeler ise ergitme işlemleri sırasında cüruf fazına geçerek geri kazanımları gerçekleştirilememektedir. Plastikler, redükleyici kok görevi ile ergitme işlemlerinde enerji kazanımı için kullanılmaktadırlar, geri kazanımları ise gerçekleştirilememektedir [56]. Nihai saflaştırma işlemlerinin yapılabilmesi için pirometalurjik yöntemler sonrasında hidrometalurjik ve elektrometalurjik yöntemlerin kullanılması gerekir, kıymetli metaller ancak bu süreçler sonrasında elde edilebilmektedir [36].

## 4.3.2 Yeni Geliştirilen Yöntemler

### 4.3.2.1 Plazma Ark İle Ergitme Yöntemi

Özellikle yüksek yoğunluklu bağlantı noktaları bulunan çok katmanlı PCB 'lerin geri kazanımı sırasında kullanılan bu yöntem, yüksek enerjili bir teknolojidir. Termal plazma alanı, düşük basınçlı akışkan bir gaz içerisinden elektrik akımının geçirilmesi sırasında oluşturulur ve bu alanda sıcaklık 1650°C'den 10000 °C'ye kadar çıkartılabilmektedir [51].

Sistemde plazma enerjisinin kaynağı, plazma ark elektrotlarıdır, inert gazlar bu elektrotlar arasından geçerek, enerjiyi ergitilmek istenen materyal üzerinde transfer ederler. Örneğin DC Plazma Ark sistemlerinde, elektrotlar arasında oluşan ark direk olarak ergiyik metal banyosunu oluşturmaktadır. İşlemler sırasında sıcaklık 1400 °C civarındadır. İşlem sonrası PCB içerisindeki metalik ve seramik bileşenler ergiyik banyosunu oluştururken, fırından çıkan gazlar su ile gaz soğutma kulelerinde soğutulurlar, bu kuleler içerisinde bulunan torbalı filtrelerde HCl ve SO<sub>x</sub> kireç ile NO<sub>x</sub> ise katalitik konverter amonyak enjeksiyonu ile bertaraf edilir. Dioksin bileşikleri, torbalı filtrelerdeki aktif karbon tarafından absorbe edilirler. İşlem sonrası ergiyik, fırından alınarak, geri kazanım veya bertaraf işlemlerine tabi tutulurlar [52]. Şekil 4.8'de Plazma Ark yöntemi ile ergitme işlemlerine ait örnek bir akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.8 Plazma ergitme işlemi akış diyagramı [52]

#### 4.3.2.2 Piroliz

Piroliz, atıklar içerisindeki organik materyallerin oksijensiz bir ortamda sıcaklık etkisiyle bozunarak, karbonlu kömür, yağ ve yanıcı gazlara dönüşmesi ve işlem sırasında açığa çıkan katı atıklardan metaller veya diğer katı materyallerin geri kazanılabildiği bir yöntemdir. Piroliz sırasında organik materyaller, gaz veya sıvı daha küçük moleküller oluşturacak şekilde bozunurlar. Açığa çıkan sıvı, piroliz yağı olarak adlandırılırken, direkt yakıt olarak ya da işlenerek rafine edilmiş olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda, birçok farklı atık tipinin pirolize uğratılması sonucu oluşan bu yağın kompozisyonunda farklı kimyasallar bulunmasından dolayı, kimyasal hammadde olarak da kullanılmaktadır. Piroliz sonucu açığa çıkan katı kalıntılar ise, metal ve inorganik bileşenler içermekte olup, geri kazanım potansiyelleri yüksektir [7].

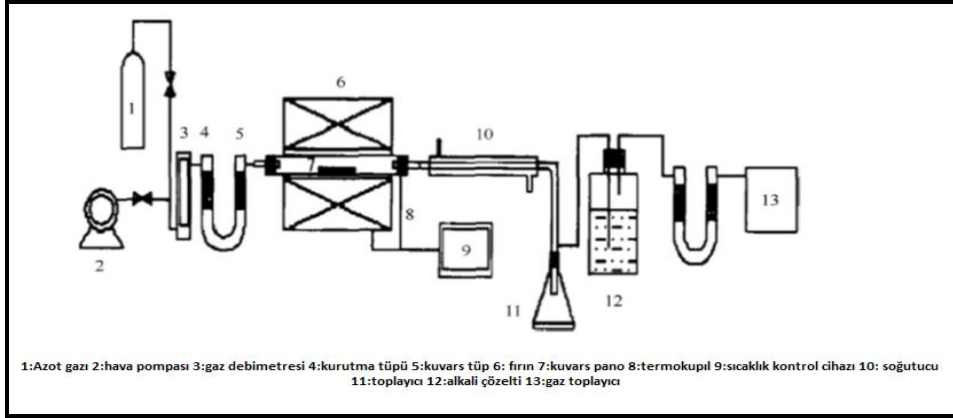
Piroliz yöntemi, plastikler, lastikler, belediyelere ait katı atıklar vb. birçok atık sistemine uygulanırken, ekonomik ve çevresel açıdan incelendiğinde PCB hurdalarının geri kazanımında son yıllarda alternatif olarak kullanılan bir yöntemdir [32]. PCB'lerin yapı materyallerinden biri olan cam elyafı güçlendirilmiş polimerler, genellikle termoset



tipi plastik malzemelerdendir ve ergitme ile geri kazanılamazlar. Yanma esnasındaki kalorifik özelliklerine ait değerler düşüktür ve yakıldıklarında yapıda bulunan alev geciktiriciler, yanma sonucu polibromlu dibenzo-p-dioxins (PBDDS) ve polibromlu dibenzofurans (PBDFs) oluşturduklarından zararlı bileşenleri oluştururlar [53]. PCB' lere bu yöntemin uygulanması ile yapıda bulunan organik polimerlerin bozunması sonucu kimyasal hammadde ve yakıt oluşturulurken, metaller ile baskılı devrelerin çoğunda bulunan olan cam elyafın (inorganik kısım) ise büyük bir kısmı geri kazanılabilmektedir. Geleneksel yöntemler ile yapılan işlemlerde, cam elyaf içeren komponentlerin geri kazanımı gerçekleştirilemediğinden, işlemler sonrası düzenli depolama veya yakma işlemleri ile bertaraf edilmesi gerekmektedir. Proses sırasında yeterince yüksek sıcaklıklarda, elektronik komponentlerin PCB 'lere bağlanmasını sağlayan lehimli kısımlar da eriyebilmektedir [54]. İşlemler sonrasında termal etkinin bir sonucu olarak, PCB 'ler gevrek malzeme özellikleri gösterirler ve uygulanacak diğer mekanik/fiziksel işlemler ile kolaylıkla işlenebilirler [55].

Baskılı devreler içerdikleri yüksek metal miktarlarından dolayı, oluşan piroliz yağında belirli bir miktarda Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sr ve Zn bulundurabilmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda bu değer,  $2\text{mg g}^{-1}$  metal konsantrasyonu oluşturacak şekilde tespit edilmiştir [32].

Piroliz işlemleri genellikle  $400^{\circ}\text{C}$  ve  $700^{\circ}\text{C}$  gibi düşük sıcaklıklarda ve 45 dakikadan uzun sürelerde, yüksek saflıktaki azot gazı eşliğinde uygulanır. Organik materyallerin bozunması sonucu açığa çıkan kalorifik değer, piroliz için gerekli enerji ihtiyacını karşılamaktadır. Piroliz sırasında açığa çıkan gazlar soğutma kanallarından geçirilir, yoğunlaşmayan gazlar ise atık gaz artıma ünitelerinde alkali kimyasallar ile işleme tabi tutulurlar. İşlem sonrası kalan katı partiküller, inorganik partiküller, metaller ve karbondur. Açığa çıkan piroliz yağı sistemden ayrılır ve biriktirilir [36]. Şekil 4.9'da laboratuvar ölçekli bir piroliz sisteminin şematik çizimi verilmiştir.



Şekil 4.9 Laboratuvar ölçekli piroliz sisteminin şematik çizimi [57]

Piroliz işlemi, plastiklerin bir enerji kaynağı olarak geri kazanımı ve metalik komponentlerin ana yapıdan ayrılmasını sağlamak amacıyla kullanılırken, işlemlerin devamında geleneksel yöntemler kullanılmakta ya da piroliz işlemi ile birleştirilmiş olarak kullanılmaktadır [60].

Örneğin daha önce yapılmış bir çalışmada, üç kademeli olarak geri kazanım süreçleri uygulanmıştır. Birinci kademedede, metal ayrımını gerçekleştirebilmek amacıyla atık durumdaki PCB 'ler azot gazı atmosferi altında epoksi reçinelerin bozunması ve metal cüruf ayrımı yapılabilmesi amacıyla 1200°C'de HaOH ilavesi ile pirolize uğratılmışlardır. Ergitmenin sonunda Fe, Cu, Pb ve kıymetli metaller elementel halde ergitmenin yapıldığı potanın alt kısmında bulunur, üst kısımda ise  $Al_2O_3$ , CaO ve  $SiO_2$  içeren cüruf fazı bulunur. İkinci aşamada, piroliz aşamasının metalik kısmı, bakır saflığının yükseltilmesi amacıyla hava ortamında cürufu birlikte tekrar ergitilirler işlem sonucunda  $Cu_2O$  içeren yeni bir cüruf fazı ortaya çıkmıştır. Üçüncü aşamada ise, piroliz gazlarındaki kirleticiler nedeniyle oluşan etkinin ortadan kaldırılması amacıyla  $Cu_2O$ 'nun redüklenmesidir. Ergitme sırasında, fırın içerisine piroliz gazı gönderilerek, gazın içerisindeki hidrokarbon bileşikleri ile  $Cu_2O$  içerisindeki alkaliler  $Cu_2O$  içeren cüruftaki asidik gaz bileşenleri tarafından gaz fazında abrosbe edilmiş ve bakır geri kazanılmıştır [57].

#### 4.3.2.3 Üstten üfleme prosesi

Bu yöntemde, PCB'ler, Cu-Ni-Sn alaşımları ile Zn ve Pb oksitleri içeren cüruf bileşiklerine dönüştürülmektedir. PCB'lere uygulanan termal işlemler döner bir fırın içerisinde, iki farklı, 700°C'de oksijenli yakma ve ardından 1250°C'de ergitme aşamalarından oluşmaktadır. Ergitme işlemi sırasında, sıcaklık erime noktasına kadar yükseltilir ve ergiyik oksitlenerek Pb ve Zn buharlaşır ve Si, Al ve Fe içeren oksitli bileşikler oluşturulur. 700°C'de yapılan yanma işlemi ile organik materyallerin ayrılması sonucu, kül ve cüruf şeklinde iki ayrı faz oluşmaktadır ve oluşan kül, hacimce %60, ağırlık olarak ise %36 azalma göstermektedir. Ergitme işlemi öncesi, materyal özelliklerine bağlı olarak, öğütme veya manyetik ayırma uygulanabilmektedir. Ergitme sırasında toplayıcı metal olarak, bakır ve çeşitli curuflaştırıcıların ilavesi yapılabilmektedir. Girdi materyalinin Fe içeriğinin yüksek olduğu durumlarda, curuflaştırıcı ilavesi ve oksitleyici bir ortamda ergitme yapılması gerekmektedir [57].

İşlem sonrası ergiyik, kok ile redüklenir ve cüruf metal ayrımı gerçekleştirilir. İşlem sonrası elde edilen cüruf, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO ve yaklaşık %3 oranında Fe içerir. Curufun metal içeriğinin düşük olması nedeniyle tekrar geri kazanımda liç işlemleri yerine, kontstrükyonlarda yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır [36]. İşlemler sırasında özellikle yakma nedeniyle oluşabilecek toksik bileşenlerin bertarafı için prosesin her iki kademesinde de farklı gaz arıtma sistemleri kullanılmaktadır [47].

#### 4.4 Hidrometalurjik Geri Kazanım Yöntemleri

Hidrometalurjik yöntemler ise geri kazanım işlemleri, PCB'lerin çeşitli solventler içerisinde liç işlemlerine tabi tutulması ve sonrasında uygulanan empüritelerin çökeltilmesi, solvent ekstraksiyonu (SX), adsorpsiyon, iyon değişimi (IX) vb. yöntemlerle metallerin geri kazanımını içeren işlemler bütünüdür [16]. Çözünme işlemleri sonrası metal kazanımı için çözeltilere, redüksiyon, kristallenme vb. yöntemler ile elektrolitik saflaştırma işlemleri uygulanabilmektedir. Özellikle son yıllarda, tüm materyallerin geri kazanım şartlarını belirleyebilmek için birçok pilot proje geliştirilmiş ve farklı çözücü ortamlar kullanılarak işlemler gerçekleştirilmiştir [58].

Pirometalurjik yöntemlerle karşılaştırıldığında, kolay kontrol edilebilen, sonuçları tahmin edilebilir, gaz emisyon değerleri açısından çevresel etkisi az, metal kazanma verimi yüksek ve nispeten küçük ölçekli uygulamalar için daha uygundur [59].

Hidrometalurjik yöntemler öncesinde genellikle fiziksel/mekanik işlemler uygulanmaktadır. Özellikle çok katmanlı PCB'lerde katmanlar arasına çözeltilinin etki edememesinden dolayı, çözünme zamanını ve toplam metal ekstarksiyonu olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu nedenle, liç işlemleri öncesinde boyut küçültme işlemlerinin yapılması gerekmektedir ve bu şekilde metal kayıpları %10 ile %35 arasında değişen miktarlarda azaltılmaktadır [62]. Özellikle kıymetli metallerin geri kazanımlarında kullanılan çözeltiye alma işlemlerine ait yöntemler, Siyanür, Halojen, Tiyöüre ve Tiyosülfat Liçleridir.

Siyanür liçi, özellikle maden endüstrisinde, kullanılan bu yöntem, altının, siyanürlü çözeltilerde çözünmesi esasına dayanan elektrokimyasal bir prosestir. Çözünme sırasındaki toplam reaksiyonlar, aşağıda verildiği şekildedir.



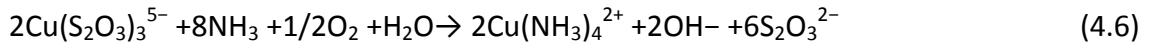
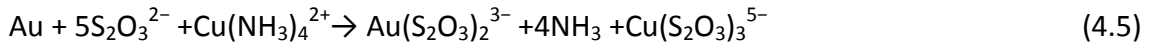
Siyanürlü ortamda maksimum çözünme için, yüksek alkali ortam uygulanmakta ve pH 10 ile 10,5 arasında kullanılmaktadır [47]. Bu prosesin, siyanür nedeniyle yüksek toksik özellik göstermesi, siyanür yerine daha düşük toksiditeye sahip tiyöüre kullanılmaktadır. Aynı zamanda siyanür prosesi düşük hızda kinetik özelliğe sahiptir [61]. Tiyöüre liçinde, asidik ortamda (pH:1-1,5), altın katyonik kompleksler oluşturarak çözünür, çözünme sırasında oluşan reaksiyonlar, altın ve gümüşün kinetik özellikleri açısından daha hızlı çözünme özelliği göstermektedir ve bu nedenle işlem hızlıdır.



Ficeriova ve Balaz tarafından daha önce yapılan çalışmada, 45 dakika süresince uygulanan liç işlemleri sonrası %96-97 oranlarında Au ve Ag geri kazanımı, 120 dakikalık liç işlemleri sonrasında ise %71 Cu, %18 Pb'nin geri kazanımı sağlanmıştır [64].

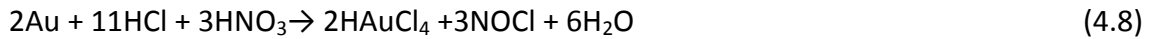
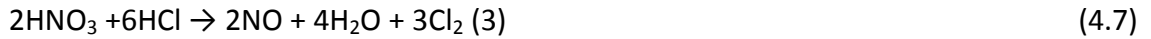
Ancak bu yöntem, ekonomik açıdan siyanürden daha yüksek maliyetlere sahiptir. Aynı zamanda reaksiyonlar sırasında, tiyoüre hızlı bir şekilde oksitlenir ve bu nedenle de tüketim miktarları yüksektir.

Bir diğer yöntem olan Tiyosülfat liçinde, altın, bakır iyonlarının katalitik etkisiyle oluşan reaksiyonlar ile çözünmektedir. Kullanılan tiyofülfatın etkisini, yüksek sıcaklık ve düşük pH değerleri azaltmaktadır. Bu nedenle uygulanan alkali ortam pH 9-10 arasında kullanılmadığıdır. Bakır (II) iyonlarının, metalik formdaki altının oksidasyonu ve Au<sup>+</sup> iyonlarının oluşumu aşağıdaki reaksiyonda verilmiştir.



Tiyosülfat liçinde, ekstraksiyon sırasındaki tüketim miktarları yüksektir. Oluşan reaksiyonlar yavaş ilerlemekte ve ancak bakır iyonlarının varlığında reaksiyon gerçekleşebilmektedir. [64]

Halojenli liç işlemlerinde, florlu, klorlu, bromlu ortamlar kullanılarak altının çözünmesi sağlanmaktadır. Altın ve diğer platin grubu metallerin çözünmesi amacıyla geleneksel olarak kral suyu ile çözümlendirme işlemleri uygulanmaktadır. Altının çözünmesine ait reaksiyon aşağıdaki gibidir.



Young ve Derek tarafından daha önce yapılan bir çalışmada, metal ve çözücünün 1/20 (g/ml) olarak kullanıldığı ve reaksiyon süresinin 3 saat olduğu işlemde %97 oranında altın geri kazanılmış bunun yanı sıra gümüşün ise %98'inin reaksiyon sırasında stabil olduğu tespit edilmiştir [15].

Yukarıda anlatılan çeşitli çözeltiler yardımı ile çözülmüş olan metallerin, bu çözeltiler içerisinden geri kazanımı için Sementasyon, Solvent Ekstraksiyonu (SX), Aktif Karbon Adsorpsiyonu gibi birçok yöntem kullanılmaktadır. Sementasyon yönteminde kullanılan en yaygın işlem, çinko ile yapılan metal-metal redüksiyonudur. Altın içeren çözeltiler, metalik Zn ile işleme tabi tutulduğunda, çinko çözünerek çözeltiliye geçer ve altın ise

metalik formda çöker. Altın içeren siyanürlü çözeltilerde işlem sırasında metalik çinko partikülleri yüzeyinde, Au katodik olarak birikirken, Zn ise anodik olarak korozyona uğramaktadır. Uygulan alkali ortam genellikle pH9-11 arasında değişmektedir [47].

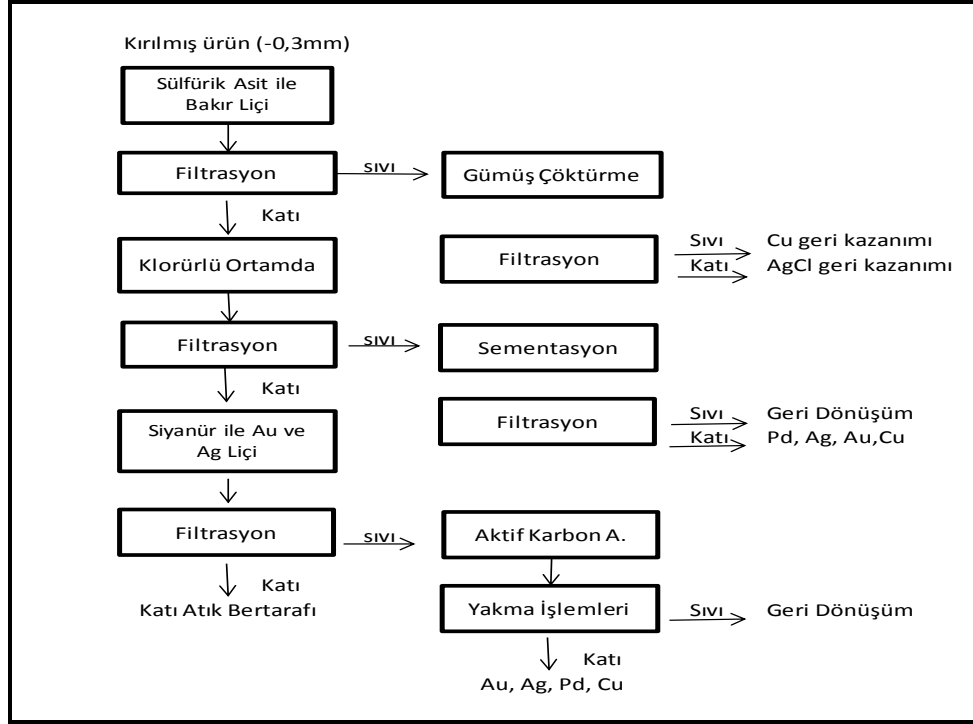


Tiyoüre ve tiyosülfat ve kral suyu ile yapılan işlemlerde ise çözeltilerinden metal kazanımı için ise sodyum borohidrat (SBH) kullanılmaktadır [47].

Solvent ekstraksiyonu kullanılarak uygulanan sistemlerde, organofosforlu, guanidinli ve amin- organofosforlu türevlerin karışımı olarak ekstarksiyon gerçekleştirilmektedir. Sastre ve Maadi tarafından yapılan çalışmada, NaOH ve NaCN içeren çözeltiden Au sıyırma işlemleri için Ciyanex 921 tipli ekstraktant kullanılmış ve %90 oranında Au geri kazanımı sağlanmıştır. Shibata ve Matsumoto tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise klorürlü ortamda liç edilmiş bilgisayar ana kartları, solvent ekstraksiyonu uygulanması sonucu %88 Au elde edilmiştir [47].

Aktif Karbon Adsorpsiyonu ise, siyanür liçi sonrası, CIP (Carbon-in-pulp) ve CIL (Carbon-in-leach) yöntemleri ile çözeltideki Au, Ag ve Pd, aktif karbon üzerine adsorbe edilmekte ve daha sonra uygulanan sıyırma işlemleri ile geri kazanılmaktadır [63].

Girdi materyalinin metal ve kıymetli metal içeriğine göre kullanılan yöntemler, değişkenlik göstermektedir. İşlemlere ait örnek bir akış diyagram Şekil 4.10'da verilmiştir. Quinet tarafından yapılan çalışmada (Şekil 4.8), uygulanan yöntemlerde sülfürik asit ile çözümlendirme ve çöktürme sonucu Cu ve Ag, kalan filtratın klorürlü ortamda çözünmesi ve semente edilmesi sonucu Pd ve Au, siyanür liçi ve aktif karbon adsorpsiyonu sonucu ise tüm kıymetli metaller geri kazanılmıştır [47].



Şekil 4.10 Kıymetli metallerin hidrometalurjik geri kazanım işlemleri örnek akış şeması

#### 4.5 Biyometalurjik Yöntemler

Mikropların, yapısal veya katalitik fonksiyonlarından dolayı metal türleri ihtiva etmesi ve prokaryotik veya ökaryotik olma özelliklerine bağlı olarak metaller ile etkileşime girmesi, metallerin selektif olarak geri kazanılmasını sağlamaktadır. Cevherlerin zenginleştirilmesi amacıyla mikroorganizmalar yardımıyla uygulanan yöntemler özellikle sülfütlü cevherlerden bakır ve altının ekstraksiyonu için kullanılmaktadır [65].

PCB'ler içerisindeki altının geri kazanılması amacıyla Faramarzi tarafından yapılan çalışmada, farklı organizmaların metal-siyanatları oluşturma etkileri incelenmiştir. Çalışmalar sırasında 5mm x 10mm boyutlarında kesilmiş baskılı devreler kullanılmıştır. Glütamat (4.4); KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (1.4); Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O(2.1); MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O (0.2); FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O (0.005); glisin (0.75) ve metiyonin (1.5) (g/L) ortamda kültürlendirilmiş siyanojenik tip violaceum bakterisi kullanılmış ve altın, disiyanoaurat (Au(CN)<sup>2-</sup>) çözeltisi oluşturacak şekilde mikrobial olarak çözünmüştür. Altınla birlikte aynı zamanda yapıda bulunan nikel de çözünmüştür. İşlemler sonucunda altının %14,9'unun çözünmüş olduğu tespit edilmiştir [65].

Uygulan tüm yöntemler birbirleriyle kıyaslanması sonucu sistemin avantaj ve dezavantajları Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Geri kazanım yöntemlerinin kıyaslanması

Gerı Kazanım Yöntemleri	Yöntemin Avantajları	Yöntemin Dezavantajları
Fiziksel/Mekanik	Tüm yöntemler için ön hazırlama prosesi Yatırım maliyetleri düşük Kolay uygulanabilir	Yüksek metal kayıpları İşlemler sırasında açığa çıkan toz ve toksik bileşenler
Pirometalurjik	Plastikler enerji kaynağı olarak kullanılabilmekte İstenen metal türüne göre ön işlemler zorunlu değil	Seramik ve cam içeren materyallerin geri kazanımı yapılamamakta Açığa çıkan cüruf nedeniyle katı atık miktarı artmakta Yüksek sıcaklıklar nedeniyle toksik bileşenler oluşmakta Al ve Zn’ nin geri kazanımı yapılamamakta Yatırım ve işletme maliyetleri yüksek
Hidrometalurjik	Gaz emisyon miktarları, pirometalurjik yöntemlere göre düşük Metal kazanımı yüksek Küçük ölçekli uygulanabilir Çok çeşitli yöntemler uygulanabilir	Çözeltiler nedeniyle oluşan atık su miktarları yüksek Ön işlemlerin yapılması zorunlu
Biyometalurjik	Düşük operasyonel maliyetler Düşük miktarda kimyasal atık eldesi Zararlı gaz çıkışı yok Küçük ölçekli uygulanabilir	Uzun süreli işlemler Atık kompozisyonları işlemi olumsuz yönde etkileyebilir (toksik bileşenler)



### **BASKILI DEVRELERİN ERGİTİLMESİ İLE İLGİLİ DENEYSEL ÇALIŞMA ÖRNEKLERİ**

Byung vd. kıymetli metallerin pirometalurjik olarak geri kazanımı için yaptıkları çalışmada, kollektör metal kullanılmadan, PCB hurdalarının, kullanılmış otomobil katalizörleri birlikte ergitilmesi sonucu ergitme şartları; sıcaklık, süre ve farklı miktarda karışımlar kullanılarak incelenmiştir. Uygulanan işlemler, sabit sıcaklıkta, farklı sürelerde gerçekleştirilen yakma süreçleri ile başlamış, farklı kompozisyonlarda curuflaştırıcılar ve redükleyici olarak karbon kullanılarak ergitme işlemi yapılmıştır. Ergitme sonrası cüruf-metal ayrımı yapılarak, kompozisyon analizi gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında kullanılan PCB ve kullanılmış otomobil katalizörleri işlemler öncesi kırılmış (-2mm) ve 100gr'lık miktarlar şeklinde 873°K'de 30-60-90-120-150 ve 180 dakikalık zaman aralıklarında yakılmıştır. Yakma sonrası, çıkan ürünlerin ağırlıkları ölçülerek % ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre PCB 'lerde 90 dakikalık, katalizörlerde ise 30 dakikalık yakma işlemleri sonucunda optimum değerler elde edilmiştir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 Yanma işlemi sonrası materyal kompozisyonu [66]

PCB (873 K-90dk yakma işlemi )				Katalizör ( 873 K-30dk yakma işlemi )	
Element	Konsantrasyon	Element	Konsantrasyon	Element	Konsantrasyon
Ag	0,124±0,004	Sn	3,24±0,03	Pt	0,180±0,008
Au	0,042±0,009	Zn	0,16±0,03	Pd	0,120±0,003
Pd	0,010±0,002	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,97±0,009	Rh	0,018±0,001
Fe	1,40±0,01	SiO <sub>2</sub>	41,89±0,25	MgO	12,3±0,1
Ni	0,28±0,01	CaO	9,95±0,14	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41,3±0,3
Cu	15,6±0,2	MgO	0,48±0,01	SiO <sub>2</sub>	46,1±0,5
Pb	1,35±0,09				

Ergitme işlemi için iki farklı tipte curuflaştırıcı, altı adet numune kullanılmış. verilmiştir. Curuflaştırıcı tipleri %ağırlık olarak aşağıdaki bileşenleri içermektedir.

- 1.tip (%ağırlık) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-16,8; CaO-28,2; SiO<sub>2</sub>-45; MgO-10
- 2.tip (%ağırlık) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15,1; CaO-15,5; SiO<sub>2</sub>-59,4; MgO-10

A1, A2, A3 numunelerinde 1. tip curuflaştırıcı kullanılırken, B1, B2, B3 numunelerinde 2. tip curuflaştırıcı kullanılmış. Ergitme sırasında, sisteme ilave edilen C, yanmış PCB miktarının %16'sı olacak şekilde sisteme ilave edilmiş ve yanma sonrası PCB'ler içerisinde oluşan metal-oksit bileşiklerini redükleyebilecek miktarda olduğu belirtilmiş. Ergitme işlemi, 1623 °K'de 60 dakika süresince gerçekleştirilmiş.

Ergitme sonrası yapılan cüruf–metal analizlerinin sonuçları % geri kazanım olarak hesaplanmış, 1. tip curuflaştırıcı ile %99 Au, %98 Pd, %98,5 Pt, >%88 Cu-Sn, <550 Fe-Pb, 2. tip curuflaştırıcı ile de %96,8 Au, %92,5 Pd, %94,7 Pt, >%70 Cu-Sn, <%40 Fe-Pb oranlarında geri kazanım gerçekleştirilmiştir. 1. tip curuflaştırıcı kullanılan ergitme işleminin kıymetli metal veriminin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buna göre; Au, Pd, Pt, Cu ve Sn, metalik fazda toplanabilmiş, Pb ve Fe ise cüruf ve metal fazları arasında dağılım göstermiştir. Sonuçlara göre herhangi bir kollektör metal kullanmadan yapılan ergitme işlemlerinin uygulanabileceği belirtilmiştir. PCB'lerdeki Cu ve Sn'nin kollektör metal olarak kullanılması ve kullanılmış otomobil katalizörlerinin ise curuflaştırıcı formda kullanılabilmesinin olası olduğu tespit edilmiştir [66].

Byung vd. tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise, FeO-CaO-SiO<sub>2</sub> curuflaştırıcı sistem seçilerek, elektronik atıklar içerisindeki Cu ve Sn'nin sadece atık bakır cürufu ile

ergitilmesi gerçekleştirilmiştir. İşlem sırasında atık bakır cürufunun seçilmesinin nedeni,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$  ve  $FeO$  gibi cüruf oluşturan bileşenler içermesidir. Çalışmaların ilk aşamasında, 5cm boyutlarında kesilmiş ve bakır cürufu ile birlikte fırına şarj edilmiş. İşlemler sırasında elektronik atıklarda bulunan plastiklerin sahip olduğu hidrokarbon bileşiklerinden dolayı, redükleyici ilavesi yapılmamış. Şarj malzemeleri 5'er adet olmak üzere AEEE/atık bakır cürufu 40:60 ve 50:50 oranlarında kullanılmış. Her deney için 100g ( $\pm 2g$ ) atık kullanılmış, işlem sırasında sisteme giren ürünlerin kimyasal kompozisyonu Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Ergitme Sırasında Kullanılan Girdilerin Ortalama Kompozisyonları [67]

Girdi (%ağırlık)	Cu	Sn	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
AEEE	18,0	2,0	<0,1	21,0	14,0	6,0	2,0
ABC	<1,0	0,0	51,5	34,5	4,1	3,4	1,2
AEEE: Atıklı elektrikli ve elektronik ekipman ABC: Atık bakır cürufu							

Sonuç olarak yapılan çalışmalar ile, atık bakır cüruflarının cüruflaştırıcı olarak kullanıldığı sistemde, %25,4 metalik faz, %39,7 cüruf fazı, %34,9 gaz fazı elde edilmiş yaklaşık %90 Cu ve %80 Sn Cu-Fe-Sn fazı oluşturarak 50:50 şarj malzeme girdisi ile geri kazanılmış [67].

Flandinet vd. tarafından yapılan diğer bir çalışmada, ergitme sırasında alkali tuzlar kullanarak ergime noktasının ( $T_m$ ) düşürülerek, piroliz için kullanılan enerjinin azaltılması ve metallerin metal içermeyen fraksiyonlardan ayrılması amaçlanmıştır. NaOH (%41) ve KOH (%59) ötektik kompozisyonunda 300°C'de 1 saat süre alkali bileşenler ergitilmiş ve kırılmış halde bulunan (20mmx10mm) atık PCB'ler ile argon gazı atmosferinde piroliz yapılmış. Metalik olmayan bileşenler, ergiyik KOH-NaOH alkali tuz banyosunda çözülmüş. İşlem sonrası ergiyik soğutulmuş, saf su ile yıkanmış ve metalik fraksiyonlar ile fiberglas, epoksi reçine ve diğer plastiklerin çözünmesi  $CaCO_3$  ve  $CaSiO_2$  içeren kahverengi toz elde edilmiş. İşlem sonucunda geri kazanılan Au, Ag, Cu ve Ni miktarları Çizelge 5.3'de verilmiştir [68].

Çizelge 5.3 Metal içeriklerinin giriş ve çıkış analizleri [68]

Metal	Giriş Analizi (g/kg)	Çıkış Analizi (g/kg)
Ni	2,17	0,95
Cu	255	287
Au	0,632	0,725
Ag	0,306	0,238

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

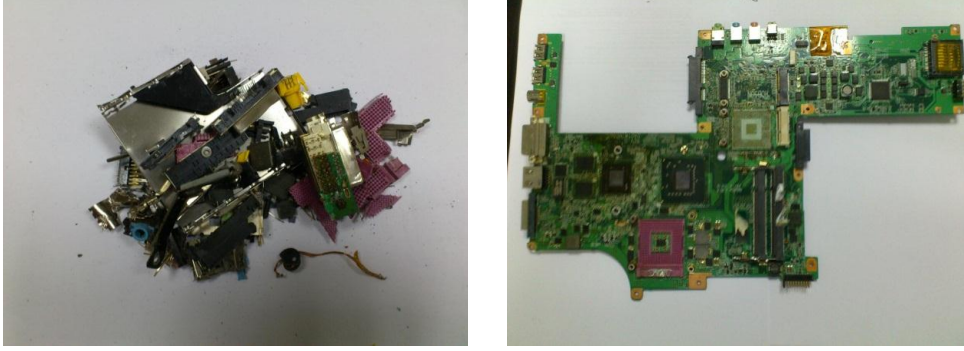
Tez kapsamında yapılan laboratuvar çalışmalarında, bilgisayarlara ait baskılı devre kartlarından (PCB) kıymetli metallerin geri kazanımına ergitme işlemleri sırasında kullanılan;

- Kollektör metal varlığı ve miktarının etkisi,
- Curuflaştırıcı miktarının etkisi,
- Curuflaştırıcı bileşiminin etkisi,

incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında, baskılı devrelerin sahip olduğu kıymetli metal miktarları elektrikli ve elektronik atık çeşitlerinde göre değişiklik göstermektedir. Örneğin, televizyonlar ve monitörlere ait baskılı devrelerde altın miktarı 100ppm'den daha düşük iken, bilgisayarlara ait 100ppm ile 400ppm arasında değişiklik göstermektedir. Geri kazanılacak olan kıymetli metal miktarının homojen olabilmesi amacıyla, sadece bilgisayarlara ait baskılı devreler kullanılmıştır. Deneyler sırasında, bakır miktarı, curuflaştırıcı miktarı ve curuflaştırıcı tipleri değiştirilerek ergitme işlemleri gerçekleştirilmiş ve yapılan değişiklikler doğrultusunda kıymetli metallerin %Kazanım değerleri tespit edilmiştir.

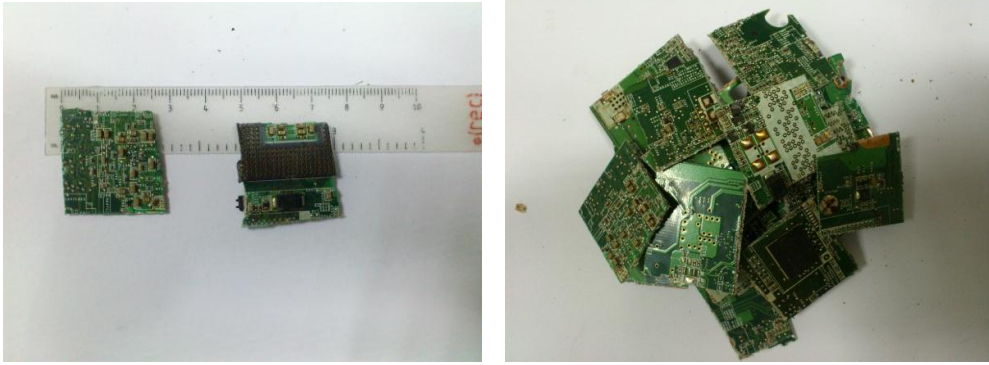
#### 6.1 Deneylerde Kullanılan Hammadde ve Cihazlar

Deneyler sırasında, ergitilecek numune olarak bilgisayar hurdalarının baskılı devre kartları kullanılmıştır. Kullanılan numuneler demontaj işlemine tabi tutulmuş ve üzerindeki zararlı kısımlar (Örneğin piller, kondansatörler vb.) el ile ayrılmıştır (Şekil 6.1)



Şekil 6.1 Baskı devresi numunelerinden ayrılan zararlı komponentler ve deneylerde kullanılan numune tipi

Demontaj sonrası, mekanik işlemler ile oluşabilecek metal kayıplarının önlenmesi amacıyla herhangi bir mekanik ön işlem uygulanmamış ve numuneler 2,5 cmx2,5 cm boyutlarında kesilmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 Deneyler sırasında kullanılan PCB numunelerinin boyutları

Deneyler sırasında kullanılan bakır parçalar, 5cmx5cm boyutlarında kesilmiş %99,99 saflıkta bakır filmaşındır (Şekil 6.3). Kullanılan curuflaştırıcılar ise Merck kalitedir.



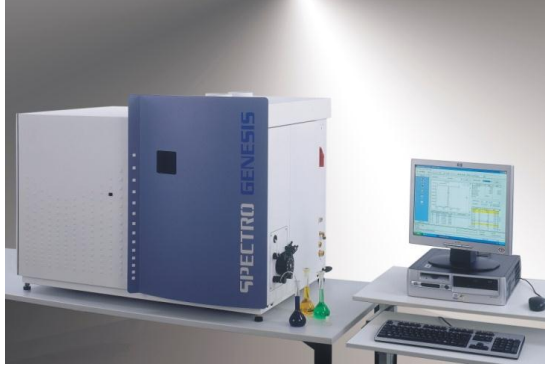
Şekil 6.3 Deneyler sırasında kullanılan bakır numuneler

Ergitme işlemleri IECO model orta frekanslı indüksiyon ocağında yapılmış, cihazın otomatik sıcaklık ölçümü yapan ekranının bulunması nedeniyle, ekstra bir sıcaklık ölçüm cihazı kullanılmamıştır. Ergitme sırasında, fırın içerisinde seramik ceketli SiC potalar kullanılmıştır (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Deneyler sırasında kullanılan indüksiyon ocağı ve potalar

Tüm numunelerin analizleri, Spectro ICP-OES (Ciros Vision-Model 071001889) ve Thermo Niton XRF 950 (Model 77919) cevher analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 Analizlerde kullanılan ICP-OES ve XRF analiz cihazları

## 6.2 Deneylerin Yapılışı

Uygulanan deneysel çalışmalar üç ana kademede gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki, kollektör metal varlığının ve miktarının %Kazanıma etkisini inceleyebilmek amacıyla yapılan çalışmalardır. İkinci olarak değişken curuflaştırıcı miktarları kullanılarak ergitme yapılmış ve optimum olan curuflaştırıcı miktarı tespit edilmeye çalışılmıştır. Üçüncü olarak ise, ergitme sırasında farklı tip curuflaştırıcılar kullanılarak, curuflaştırıcı tipinin geri kazanıma etkisi incelenmiştir. Kullanılan curuflaştırıcı bileşimleri literatür değerleri baz alınarak seçilmiş ve geliştirilmiştir [67].

Curuf oluşumu için belirli miktarlarda (Çizelge 6.1) curuflaştırıcı ilavesi yapılmıştır. Curufların baziklik değerleri aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır.



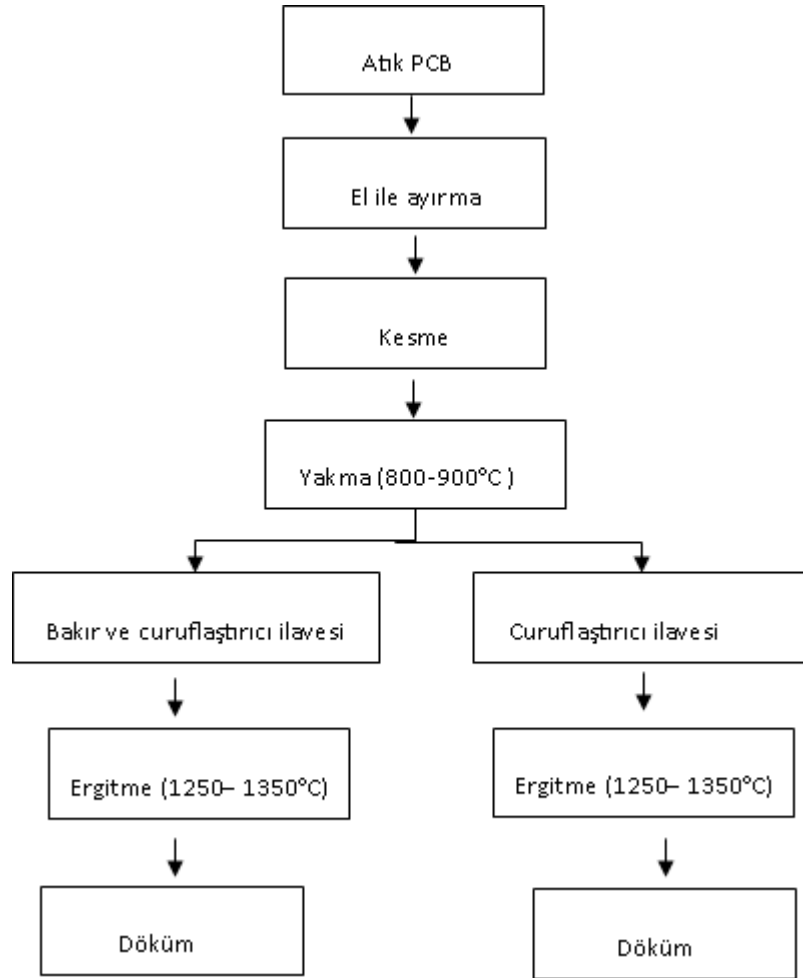
Çizelge 6.1 Curuflaştırıcı tiplerine göre kullanılan bileşikler

Bileşen	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Baziklik Oranı (B.O)
1.Tip	5%	10%	30%	20%	30%	5%	-	0,71
2.Tip	43%	6%	18%	12%	18%	5%	-	0,24
3.Tip	5%	10%	30%	5%	45%	5%	-	0,28
4.Tip	5%	20%	30%	10%	30%	5%	-	0,42
5.Tip	10%	15%	30%	30%	10%	5%	-	0,87
6.Tip	43%	15%	18%	-	18%	3%	12%	0,71
7.Tip	35%	-	-	-	-	-	65%	1,85



1, 2, 3, 4, 5 ve 6.tip curuflaştırıcılar, 1000'er gram olarak içerdikleri bileşenlerin % miktarlarına göre hazırlanmıştır. Farklı olarak 7.tip curuflaştırıcı ise diğer 6 farklı tip curuflaştırıcının içerdiği bileşenler olmaksızın, sadece  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve  $\text{B}_2\text{O}_3$  ile hazırlanmıştır. Stokiyometrik oranın iki katı olacak şekilde %65  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve %35  $\text{B}_2\text{O}_3$  oranlarında molekül ağırlıkları hesaplanarak, 211,96g  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve 201,24g  $\text{B}_2\text{O}_3$  kullanılması gerektiği tespit edilmiş , 7.1 Numune No'lu çalışmada kullanılmıştır.

Deneylerde işlenen yöntemle ilgili akış diyagramı şekil 6.62'da verilmiştir.



şekil 6.6 Deneysel çalışmalara ait akış diyagramı

Tüm deneylerde, kullanılan atık PCB'ler öncelikle fırına yüklenmiş ve plastiklerin yanması için 25dk süresince 800°C ile 900°C sıcaklıkları arasında fırında bekletilmiştir. Bu sürenin sonucunda, curuflaştırıcı ve/veya bakır ilavesi yapılmıştır. Tüm deneylerde ergitme sıcaklığı (Tm) 1250°C – 1350°C aralığında, ergitme süresi ise 1saat olarak uygulanmıştır. Ergitme sonucunda, sıvı metal kokil kalıplara dökülmüş, havada soğutulmuş ve kalıptan çıkarılarak curuf ve metal fazları birbirinden ayrılmıştır.

Kullanılan PCB miktarı, 1.tip curuflaştırıcı ile yapılan deneylerde 100g  $\pm$ 10g, diğer çalışmalarda ise 1000g  $\pm$ 90g olacak şekilde hazırlanmıştır.

Kollektör metal varlığı ve miktarı, curuflaştırıcı miktarı ve curuflaştırıcı bileşiminin % kazanıma etkisini inceleyebilmek amacıyla yapılan ergitme işlemleri sırasında kullanılan PCB, curuflaştırıcı ve bakır miktarları ile ergitme sonrası elde edilen metal ve cüruf miktarları **EK A-1**'de verilmiştir. Deneyler sırasında ilave edilen bakır miktarları, aşağıdaki oranlara göre uygulanmıştır..

$$\frac{\text{Bakır miktarı}}{\text{Curuflaştırıcı miktarı}} = 1 \quad (6.1)$$

$$\frac{\text{Bakır miktarı}}{\text{Curuflaştırıcı miktarı}} = 2,5 \quad (6.2)$$

Farklı tip ve miktardaki curuflaştırıcılar kullanılarak, bakırlı ve bakırsız olarak uygulanan ergitme işlemleri sonucunda **Ek A-2**'deki elementel halde metal-curuf analiz sonuçları (Au, Ag, Pt, Pd, Rh ve Cu), ppm(g/ton) ve yüzde (%) olarak elde edilmiştir.

Analiz sonuçlarındaki miktarlar ile elde edilen metal ve cüruf içerisindeki Au, Ag ve Pd hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar, "Metalik fazdaki kıymetli metal miktarı / Cüruf fazındaki kıymetli metal miktarı" hesaplamaları her bir numune için ayrı ayrı yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda, metaldeki ve cüruftaki kıymetli metal miktarları, yapılan hesaplamalar sonucu oranlanarak, **Ek A-3**'deki değerler elde edilmiştir. **Ek A-2**'de verilen analiz sonuçlarında görüldüğü üzere, cüruf ve metalik fazda platin ve rodyum bulunmamaktadır. Bu nedenle hesaplama yapılmamıştır.

Deneyler sırasında, fiziksel işlemler sonucu oluşabilecek metal kayıplarını minimuma indirmek amacıyla herhangi bir fiziksel ön işlem yapılmamıştır. Var olan kıymetli metal miktarı sistemde olacağından, kıymetli metal miktarlarının %Kazanım hesaplamaları aşağıda verilen formülasyona göre uygulanmıştır.

$$\%Kazanım = \frac{\text{Metalik fazdaki kıymetli metal miktarı (g) (KM}_m\text{)}}{\text{Toplam kıymetli metal miktarı (g) (KM}_m\text{+KM}_c\text{)}} \quad (6.3)$$

Elde edilen formülasyonda, %kazanım miktarının hesaplanması için metalik fazdaki kıymetli metal ile toplam kıymetli metal miktarı olarak metalik ve cüruf fazındaki kıymetli metal miktarının toplamı kullanılmıştır.

Tüm numunelere ait %kazanım miktarları **Ek A-4**'de verilmiştir.

## BÖLÜM 7

### DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

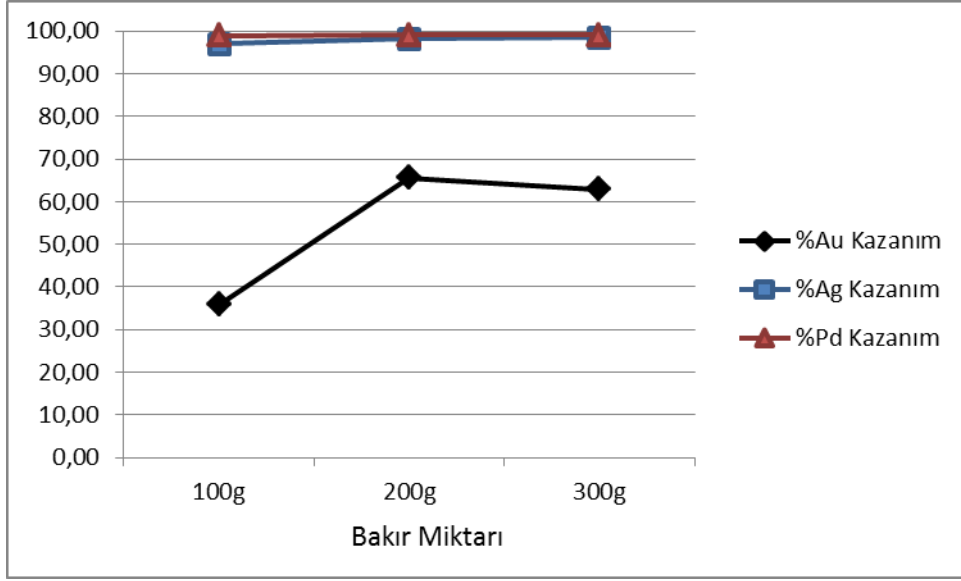
Farklı tip curuflaştırıcılar ve kollektör metal varlığı ilavesi ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen **Ek-A1**, **Ek-A2** ve **Ek-A3** ve **Ek-A4**'deki veriler doğrultusunda, %kazanım miktarlarını etkileyen faktörler incelendiğinde aşağıda verilmiş sonuçlar elde edilmiştir.

#### 7.1. %Kazanıma Kollektör Metal Kullanımının ve Miktarının Etkisi

Baziklik oranı 0,71 olan 1.tip curuflaştırıcı ile yapılan 1.1, 1.2 ve 1.3 Numune No 'lu deneylerde, Curuflaştırıcı miktarının sabit olduğu durumlarda, değişken bakır miktarlarının %Kazanıma etkisi Çizelge 7.1'de verilmektedir.

Çizelge 7.1 1.tip curuflaştırıcı için değişken bakır miktarlarında elde edilen %Kazanım değerleri

Numune No	Bakır miktarı	%Au Kazanım	%Ag Kazanım	%Pd Kazanım
1.1	100g	35,83	96,92	98,98
1.2	200g	65,54	98,18	98,99
1.3	300g	62,93	98,4	98,99



Şekil 7.1 Şekil 7.1 100-200-300g bakır miktarında elde edilen %kazanım değerleri

Şekil 7.1’de görüldüğü üzere, en yüksek %Au kazanımı 200g bakır kullanıldığında, en yüksek %Ag Kazanımı ise 300g bakır kullanıldığında elde edilmiş ise de 200 g bakır kullanımı ile arasındaki fark göz ardı edilebilecek düzeydedir. Kullanılan bakır miktarının, paladyumun geri kazanım oranına etkisi oldukça düşüktür ve 200g ile 300g’lık miktarlarda aynı %Kazanım miktarları açığa çıkmıştır.

1. tip curuflaştırıcı kullanıldığında %Au, %Ag ve %Pd Kazanımının en optimum olduğu değerler, kollektör metal olarak 200g Cu kullanıldığı durumda olduğu tespit edilmiştir.

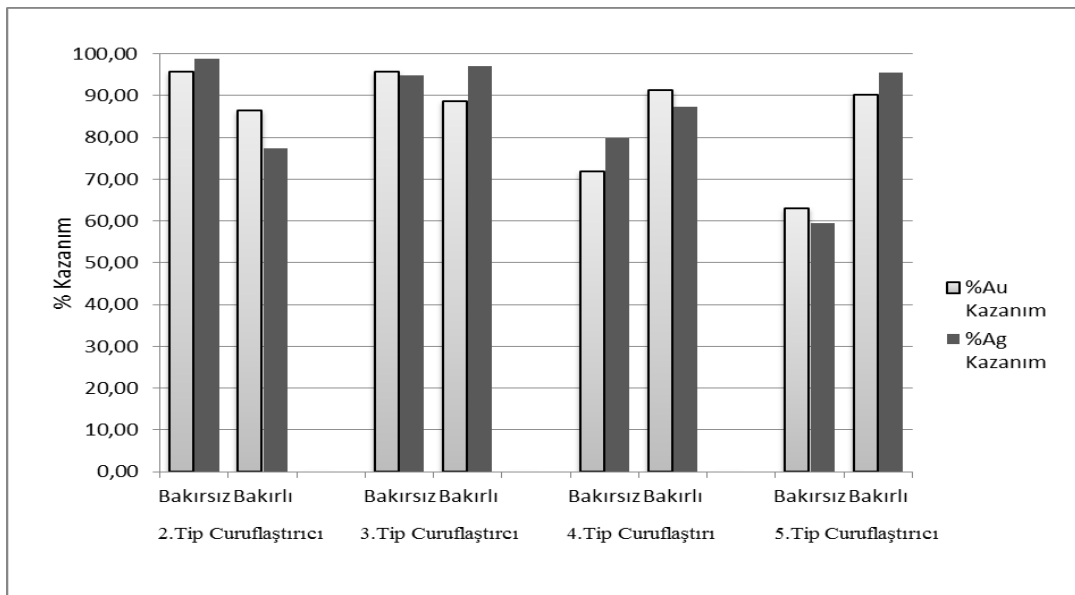
2, 3, 4 ve 5.tip curuflaştırıcılar ile yapılan bakırlı ve bakırsız ergitme işlemlerinde sabit 300g curuflaştırıcı miktarı ve kollektör metal ilaveli ergitmelerde 300g ilave Cu miktarları için sonuçlar incelendiğinde aşağıda verilen değerler (Çizelge 7.2) elde edilmiştir. Numunelere ait metalik fazın fotoğrafları Şekil 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2 Kollektör metal ilaveli ergitme işlemleri sonucu elde edilen %kazanım değerleri

Numune No	İlave Cu Miktarı (g)	%Au Kazanım	%Ag Kazanım
2.1	0	95,68	98,71
2.4	300	86,34	77,43
3.3	0	95,72	94,79
3.4	300	88,71	96,96
4.2	0	71,90	79,74
4.4	300	91,18	87,39
5.2	0	63,02	59,51
5.4	300	90,17	95,45



Şekil 7.2 2.1 ve 2.2 Numune no'lu ergitme işlemleri sonucu elde edilen metalik fazlar



Şekil 7.3 Farklı tip curuflaştırıcıların kollektör metal ilavesi ve ilavesiz % kazanım değerleri

Grafikten de görüldüğü üzere (Şekil 7.3), kollektör metal varlığında en yüksek %Au Kazanımı 4. ve 5. tip curuflaştırıcılar ile yapılan deneylerde elde edilmiştir. 4. tip curuflaştırıcının bakır ilaveli deneylerinde %Au Kazanımı artarken, %Ag Kazanımı da artmıştır. Aynı durum 5.tip curuflaştırıcı ile yapılan deneylerde de görülmektedir. Bu tip curuflaştırıcıların sahip olduğu yüksek baziklik oranlarına ve kollektör metal kullanılmasına rağmen, deneyler sırasında yeterli cüruf-metal ayırımının gerçekleşmediği ve cüruf içerisinde metalik granül parçalar olduğu görülmüştür (Şekil 7.4).



Şekil 7.4 Curuf içerisinde tespit edilen metalik granül şeklindeki parçalar

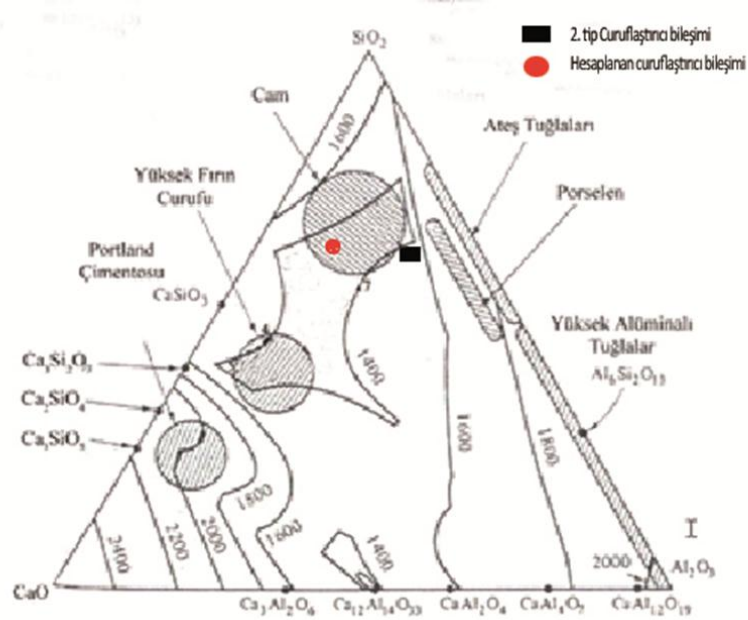
Düşük baziklik oranına sahip 2 ve 3.tip curuflaştırıcılar ile yapılan deneylerde ise kollektör metalin kullanılmadığı ergitme işlemlerinde daha yüksek %Au kazanımı gerçekleştirilmiştir. %Ag kazanımı açısından ise 2.tip curuflaştırıcının bakırsız gerçekleştirilen ergitme işlemlerinde daha yüksek kazanım elde edilirken, 3.tip curuflaştırıcıda ise bakırın ilavesi sadece %2'lik artış göstererek, etkisinin düşük olduğu görülmektedir.

En düşük baziklik oranına sahip olan 2.tip curuflaştırıcının %Au kazanımı, baziklik oranı en yüksek olan 5.tip curuflaştırıcıdan yüksek olması nedeniyle, 2.tip curuflaştırıcıyla yapılan ergitme sonucu elde edilen cürufun XRF ile analizi yapılarak, curuf bileşenleri yeniden hesaplanmıştır. Analiz sonucu Çizelge 7.3'de verilmiştir.

Çizelge 7.3 XRF analizi sonucu cürufta bulunan miktarlar

Fe	Al	Ca	Si	Cu
2.249	3.866	15.570	16.888	4.018

$Al_2O_3-SiO_2-CaO$  denge diyagramı üzerinden 2.tip curuflaştırıcının bileşimleri “■” ile, XRF analizi sonucu hesaplanan curuf bileşimi “●” ile işaretlenmiştir. Elde edilen bileşim noktası, Şekil 7.15’de gösterilmektedir.



Şekil 7.5  $Al_2O_3-SiO_2-CaO$  Denge diyagramı 2.tip curuflaştırıcı bileşim noktası

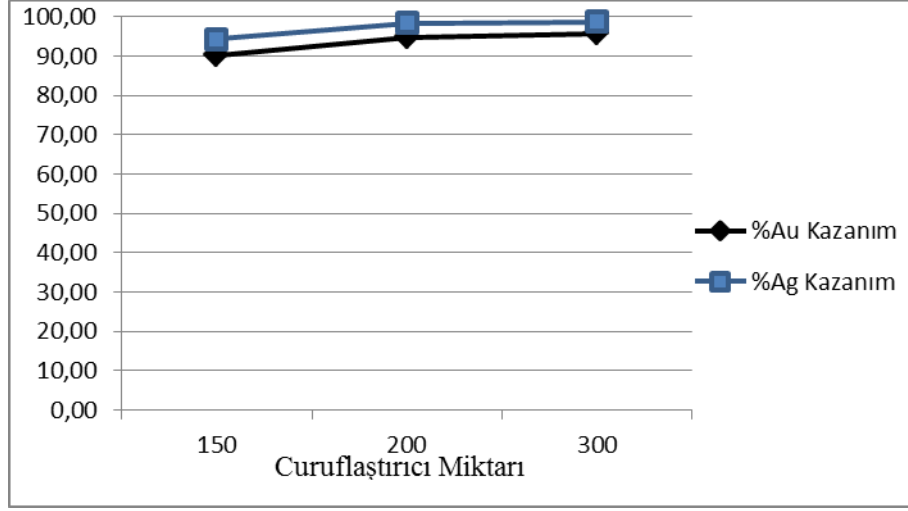
Şekil 7.5’den görüldüğü üzere, curuf bileşimi başlangıç değerinden ötelenmiş ve bu nedenle baziklik oranları değişmiştir. Kullanılan curuflaştırıcı bileşenlerindeki miktarların, elde edilen curuf bileşiminde bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle %kazanım değerleri yüksek çıkmıştır.

3.tip curuflaştırıcı ile yapılan bakır ilaveli ve ilavesiz deneylerde, curuflaştırıcının içerdiği yüksek FeO, SiC tipli ergitme potalarında bulunan Si ile deneylerin uygulandığı sıcaklıkta Fayalit ( $Fe_2SiO_4$ ) oluşumuna neden olabildiğinden işlemler sırasında potaların alt yan kısımlarında Si eksikliği nedeniyle aşınma ve boşluklar oluşmuştur. Bu nedenle bu tip curuflaştırıcı ile yapılan çalışmalarda SiC potaların kullanılması uygun görülmemektedir.

## 7.2 Curuflaştırıcı Miktarının Etkisi

2. tip curuflaştırıcı ile yapılan 2.1, 2.2 ve 2.3 Numune No’lu bakır ilavesiz deneylerde, değişken curuflaştırıcı miktarının %kazanıma etkisi incelenmiştir. 300g, 200g ve 150g miktarlarında curuflaştırıcı ile yapılan ergitme işlemleri sonucu, grafikte görülen (Şekil 7.6) % kazanım değerleri elde edilmiştir.

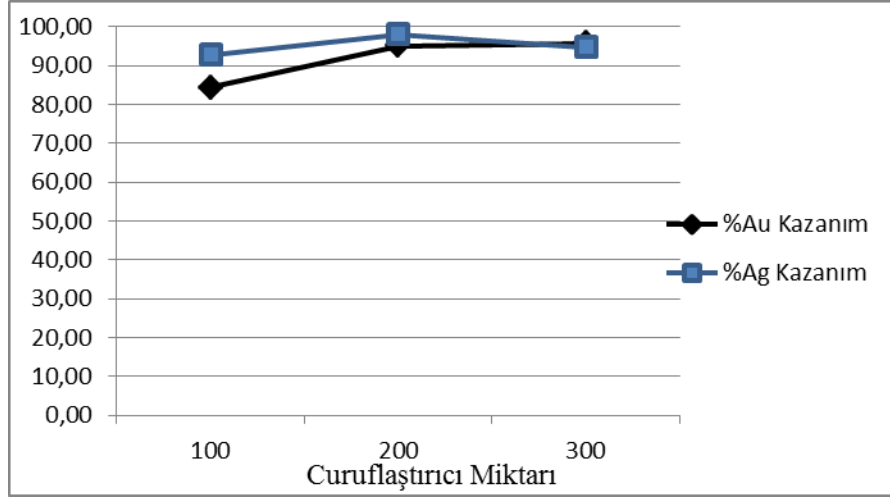




Şekil 7.6 2.tip curuflaştırıcı miktarının %kazanıma etkisi

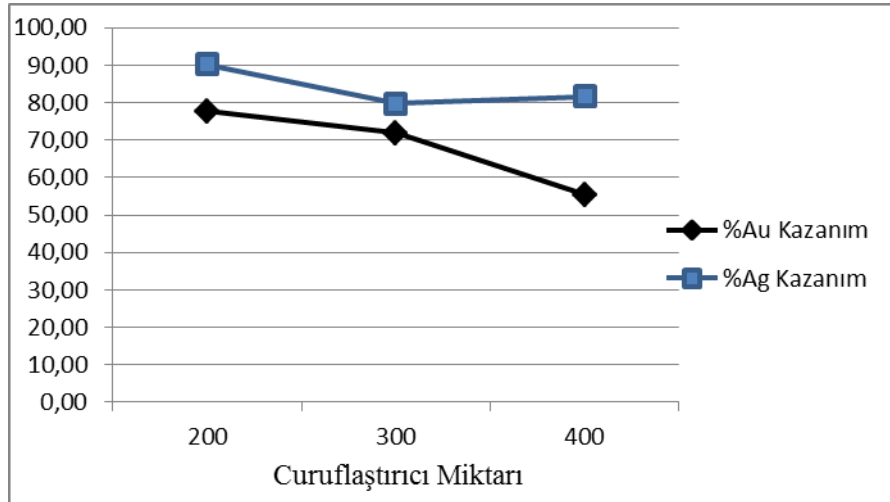
Şekilden de görüldüğü üzere, curuflaştırıcı miktarındaki artış, altın ve gümüşün paralel olarak %kazanım değerlerini arttırmıştır. 150g'dan 200g'a ve 200g'dan 300g'a geçiş sırasında %Au kazanımdaki değişim, %Ag kazanımından daha yüksektir. Artan curuflaştırıcı miktarlarında gümüşteki %kazanım değerleri toplamda, %4,43 fark oluştururken, altında ise %5,44 olarak elde edilmiştir.

Bakır ilavesiz 3.tip curuflaştırıcı ile yapılan deneylerde 100g, 200g ve 300g olarak artan curuflaştırıcı miktarları ile yapılan ergitmeler sonucu, %kazanımdaki değişim aşağıdaki grafikte verildiği şekildedir (Şekil 7.7). Görüldüğü üzere en yüksek %Au ve %Ag Kazanımı, 200g curuflaştırıcı kullanıldığında elde edilmiştir. 200g'dan 300g'a geçiş sırasında, altın ve gümüşteki %kazanım değerleri, 150g curuflaştırıcı kullanılan duruma göre yüksek olmasına rağmen, azalmıştır.



Şekil 7.7 3.tip curufıstırıcı miktarının %kazanıma etkisi

4.tip curufıstırıcı ile yapılan deneylerde, bakır ilavesi olmaksızın, 200g, 300g, 400g olarak artan curufıstırıcı miktarının, altın ve gümüş kazanımının üzerine olan etkisi incelendiğinde, aşağıda verilen grafik elde edilmiştir (Şekil 7.8).



Şekil 7.8 4.tip curufıstırıcı miktarının %kazanıma etkisi

Grafikten de görüldüğü üzere, curufıstırıcı miktarındaki artış, %Au kazanımında %77,77'den %55,36'ya oldukça büyük bir düşüşe neden olmuştur. Ergitme kollektör metal ilavesi olmaması ve oluşan yüksek miktardaki cüruf, cüruf-metal ayrımı sırasında, mekanik ayrımı zorlaştırmıştır. Bu durum sonucunda aşağıda verilen fotoğrafta görüldüğü üzere (Şekil 7.9), cüruf fazının içerisinde metalik granüller oluşmuştur. Bu granüller, Şekil 7.4'de verilen granül tanelerinden daha düşük tane boyutuna sahiptir.

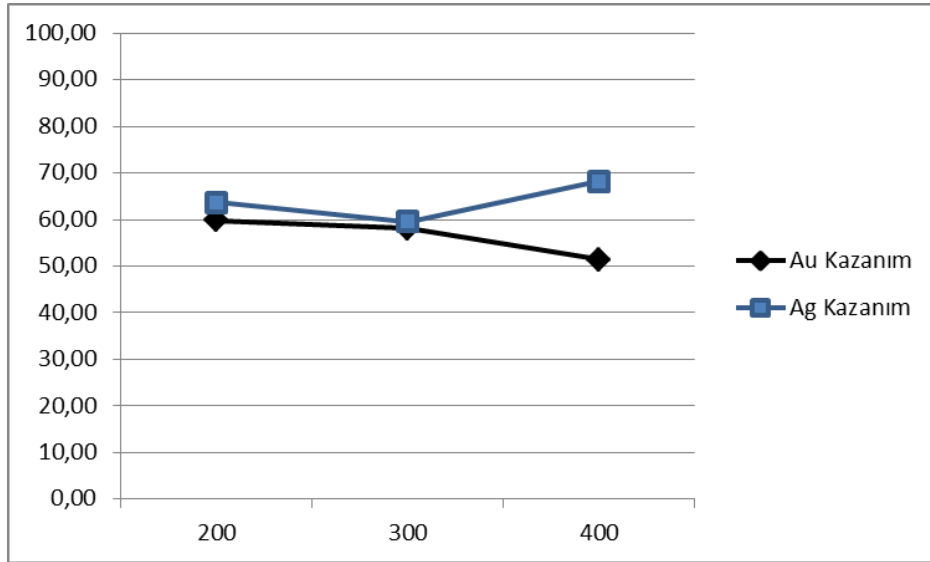
4.tip curuflaştırıcının 3.tip curuflaştırıcıya göre daha yüksek bazıklık oranına sahip olması, curuf metal ayırımının verimini arttırdığı söylenbilir.



Şekil 7.9 4.tip curuflaştırıcı ile yapılan ergitme sonucu cüruf içerisindeki metalik granül fazlar

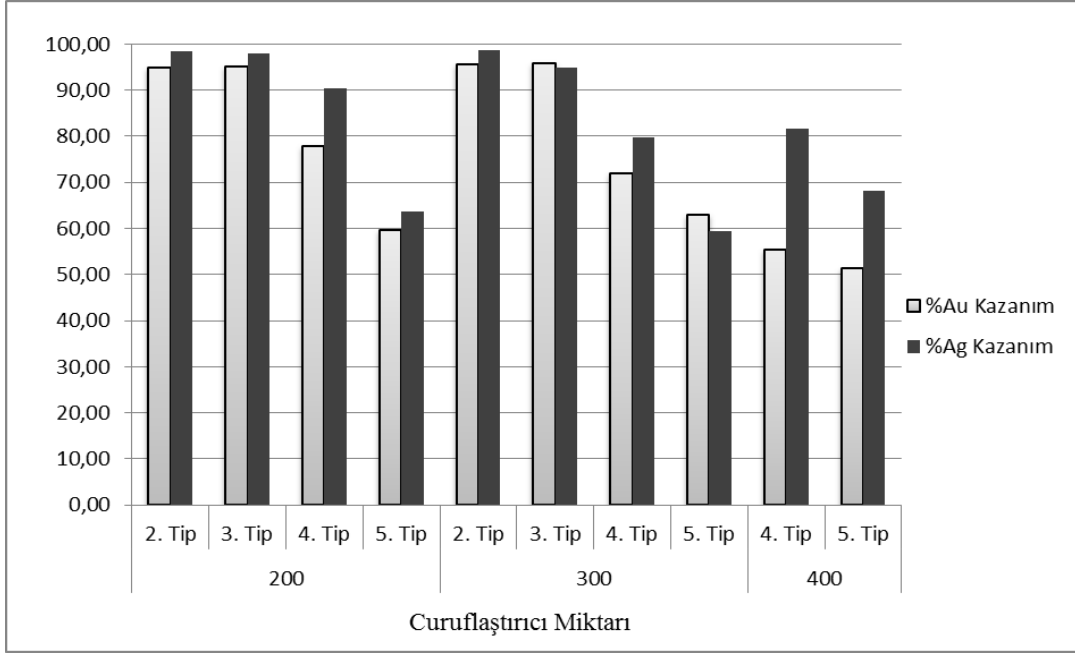
%Ag kazanımındaki deėiŐimin ise en yüksek 200g'dan 300g'a geçiş sırasında olduğu görülmektedir.

5.tip curuflaştırıcı ile yapılan deneylerde ise diğerlerinde olduğu gibi bakır ilavesiz olarak, değişken curuflaştırıcı miktarları ile yapılan ergitme işlemleri sonucunda aşağıda verilen grafik elde edilmiştir (Şekil 7.10).



Şekil 7.10 5.tip curuflaştırıcı miktarının %kazanıma etkisi

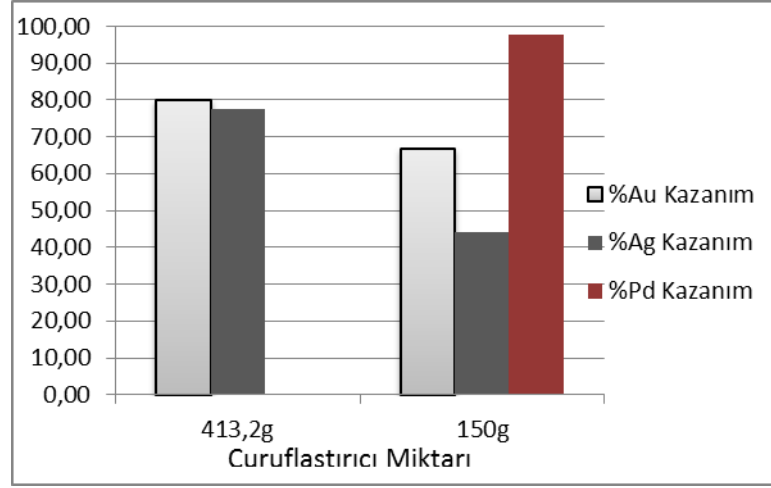
Bu tipteki curuflaştırıcı ile yapılan işlemlerde, maksimum %Au kazanımı 300g curuflaştırıcı da elde edilirken, maksimum %Ag kazanımı ise 400g curuflaştırıcıda elde edilmiştir.



Şekil 7.11 Değişken curuflaştırıcı miktarı ve bileşenlerinin %kazanıma etkisi

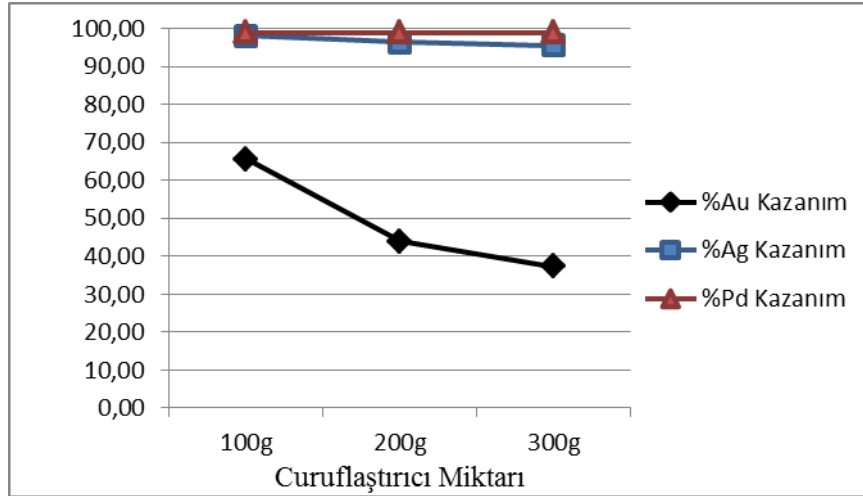
Şekil 7.11’de 200g, 300g ve 400g curuflaştırıcı miktarlarında farklı tipteki curuflaştırıcılara göre %Au ve %Ag kazanımları toplu olarak verilmiştir. Görüldüğü üzere tüm curuflaştırıcı tiplerinde en yüksek %Au kazanımı 200g ve 300g olarak kullanılan curuflaştırıcı miktarlarında elde edilmiştir. En yüksek %Ag kazanımları da aynı miktarlarda elde edilmiştir. Curuflaştırıcı tiplerinin farklılıklarına rağmen 200g ve 300g curuflaştırıcı miktarları optimum değerleri oluşturmuştur.

7.1 ve 7.2 Numune No’lu deneylerde 413,2g ve 150g miktarlar kullanılarak, curuflaştırıcı miktarının %Kazanıma etkisi incelenmiştir. 7.1 Numune No’lu deneyde stokiyometrik oranın 2 katı  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve stokiyometrik oranda  $\text{B}_2\text{O}_3$  ile toplamda 413,2g curuflaştırıcı kullanılmıştır. 7.2 Numune No’lu deneyde ise %65  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve %35  $\text{B}_2\text{O}_3$  oranında 150g curuflaştırıcı kullanılmıştır. Şekil ‘de görüldüğü üzere sadece  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve  $\text{B}_2\text{O}_3$  kullanılan curuflaştırıcı tipinde, azalan curuflaştırıcı miktarıyla birlikte %Au ve %Ag kazanım değerleri de azalmaktadır (Şekil 7.12). Aynı zamanda 150g curuflaştırıcı kullanıldığında, %Pd kazanım değeri açığa çıkmıştır ki kalan %2,11 miktarındaki paladyum cürufa geçmiştir, 413,2g curuflaştırıcı miktarıyla yapılan ergitme işleminde var olan 17,5ppm paladyumun tamamı metalik fazda bulunmaktadır.



Şekil 7.12 7.tip curufıaştırıcı miktarının %kazanıma etkisi

Curufıaştırıcı miktarının %Au ve %Ag kazanımına etkisini inceleyebilmek amacıyla aynı zamanda kollektör metal ilaveli ergitme işlemleri yapılmıştır. Öncelikle 1.tip curufıaştırıcı ile yapılan deneylerde, 100g PCB kullanılmış ve sabit bakır miktarında 100g, 200g ve 300g curufıaştırıcı kullanılarak deneyler uygulanmış ve aşağıda verilen grafik elde edilmiştir (Şekil 7.13)

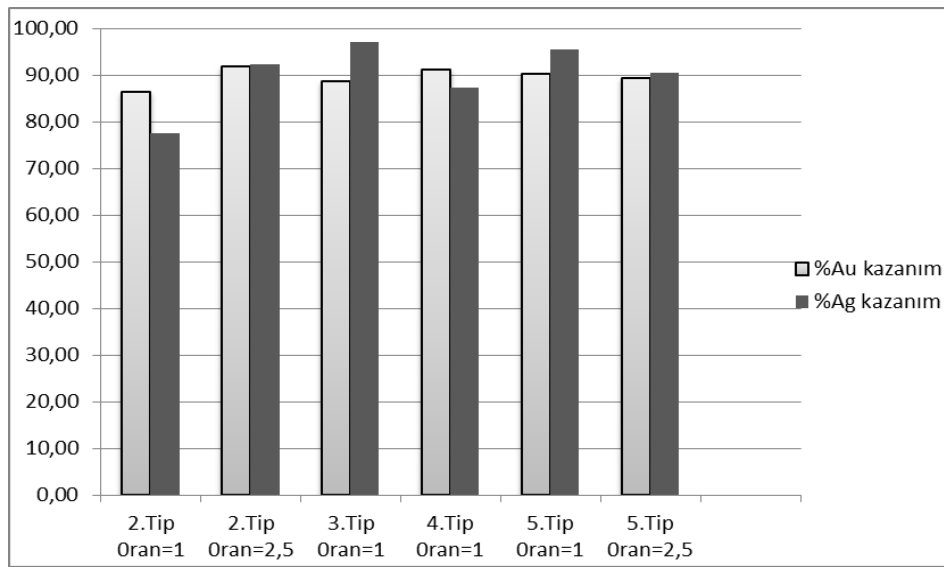


Şekil 7.13 Kollektör metal ilavesi ile 1.tip değişken curufıaştırıcı miktarının %kazanıma etkisi

Şekilden Şekil 7.13'de görüldüğü üzere, fazla miktarda curufıaştırıcı ilavesi özellikle %Au kazanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Düşük miktarda şarj malzemesine ilave edilen yüksek oranda curufıaştırıcı, cüruf miktarını arttıracığından, cürufa metal geçme olasılığını da arttırmaktadır. Deneyler sırasında, 200g ve 300g curufıaştırıcı ilavelerinde,

kullanılan PCB 'nin 2 ve 3 katı curuflaştırıcı ilavesi sonuçta %Au kazanımında yaklaşık %35 miktarında azalmaya neden olmuştur.

Şarj edilen PCB miktarları arttırılıp ortalama 1000g olarak uygulanan diğer deneylerde, 2., 3., 4. ve 5.tip curuflaştırıcılar ile kullanılan bakır ve curuflaştırıcı miktarları (5.4) ve (5.5) formüllerinde verilen oranlar uygulanmıştır. Oranın 1 olduğu durumda 300g bakır ve 300g curuflaştırıcı, oranın 2,5 olduğu durumda ise 500g bakır ve 300g curuflaştırıcı kullanılmıştır. Deneyler sonunda elde edilen %Au ve %Ag kazanımı tüm curuflaştırıcılar için ortak olarak incelendiğinde, aşağıda verilen Şekil 7.14 elde edilmiştir.



Şekil 7.14 Kollektör metal ilaveli farklı tip curuflaştırıcıların değişik miktarlarının %kazanıma etkisi

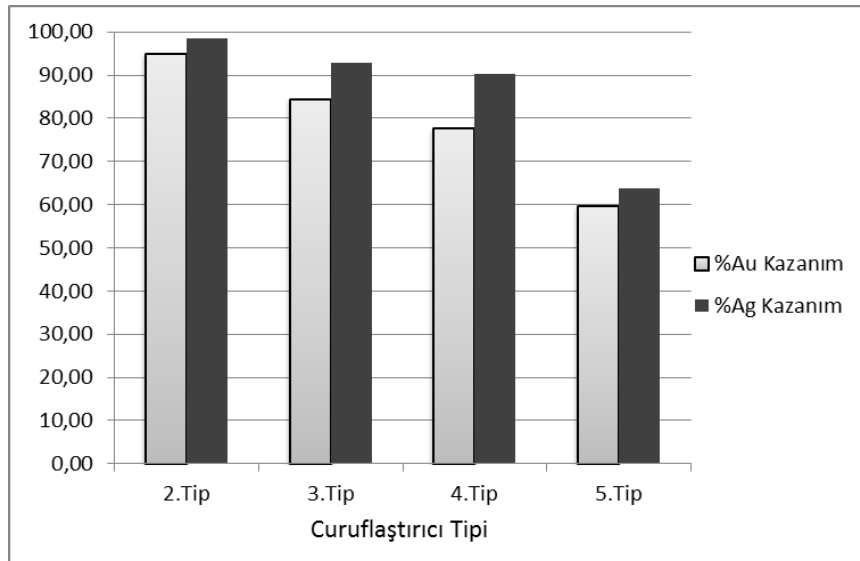
Bazılik oranı düşük olan 2.tip curuflaştırıcıya uygulan 1 ve 2,5 oranları birbirleriyle kıyaslandığında, oranın 2,5 olduğu deneylerde daha yüksek %Au ve %Ag kazanımı elde edilmiştir. Yüksek oranda kullanılan kollektör metal, altın ve gümüşün metalik faz içerisinde toplanarak, %Kazanım değerlerinin artmasına olanak sağlamıştır. Bazılik oranı yüksek olan 5.tip curuflaştırıcı ile yapılan deneylerde ise altın kazanımında yaklaşık %0,5 azalma görülmüştür. Gümüş de ise bu değer %5'dir. 5.tip curuflaştırıcı ile çalışıldığında bakır miktarının artırılması geri kazanım verimini olumsuz yönde etkilemektedir.

Oranın 1 olarak uygulandığı deneylerde ise en yüksek %Au kazanımı 4.tip curuflaştırıcı ile, en yüksek %Ag kazanımı ise 3. tip curuflaştırıcı ile elde edilmiştir.

### 7.3 Curuflaştırıcı Bileşiminin Etkisi

Ergitme koşullarında, curuflaştırıcı tipinin %kazanıma etkisini incelemek amacıyla deneysel çalışmalar kollektör metal ilaveli ve ilavesiz iki ayrı şartta incelenmiştir. Kollektör metal ilavesiz yapılan deneylerde, curuflaştırıcı miktarları sabit tutularak, kullanılan curuflaştırıcı tipinin %kazanıma etkisi incelenmiştir. Bu amaçla yapılan deneylerde öncelikle 200g daha sonra da 300g curuflaştırıcı kullanılmıştır. Her iki curuflaştırıcı miktarında da 2., 3., 4. ve 5.tip curuflaştırıcılar incelenmiştir. 1.tip curuflaştırıcı ile yapılan daha önceki deneylerde PCB miktarının (100g) düşük, cüruflaştırıcı miktarının ise kullanılan PCB 'ye göre çok yüksek olmasından dolayı elde %kazanım değerlerinden net olarak elde edilememişti. Bu nedenle kıyaslama yapılabilmesi için 1.tip curuflaştırıcı, kıyaslama dışı bırakılmıştır.

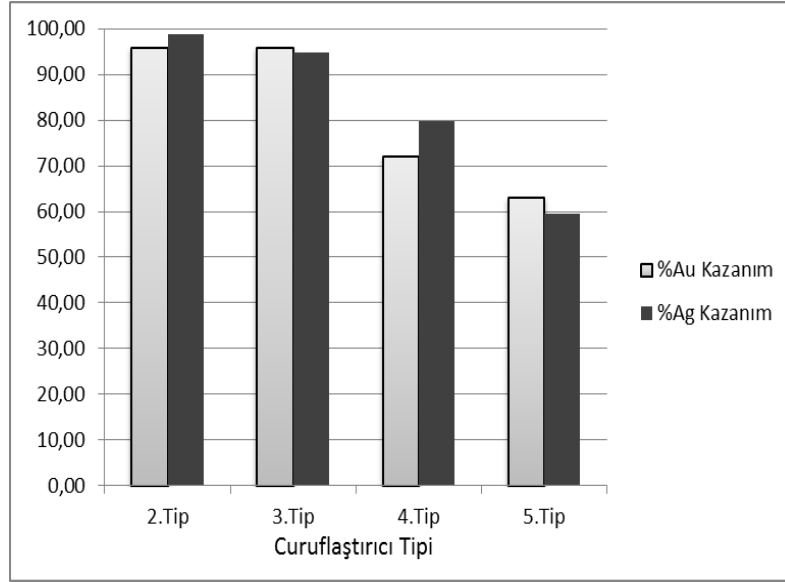
200g curuflaştırıcı kullanılan çalışmalarda, 2.2, 3.1, 4.1 ve 5.1 Numune No'lu deneylerin sonuçları incelendiğinde aşağıda verilen şekil 7.15 elde edilmiştir.



şekil 7.15 200g curuflaştırıcı kullanıldığında curuflaştırıcı bileşiminin %kazanıma etkisi

şekilden de görüldüğü üzere, bakır ilavesi olmaksızın sabit 200g curuflaştırıcı miktarında yapılan ergitme işlemlerinde, en yüksek %Au ve %Ag kazanımı, %94,81 altın ve %98,39 gümüş miktarları ile düşük baziklik oranına sahip 2.tip curuflaştırıcı kullanımıyla elde edilmiştir. Curuflaştırıcı tiplerinde baziklik oranının artmasıyla her iki kıymetli metal türünde de %Kazanım değerleri azalma göstermektedir.

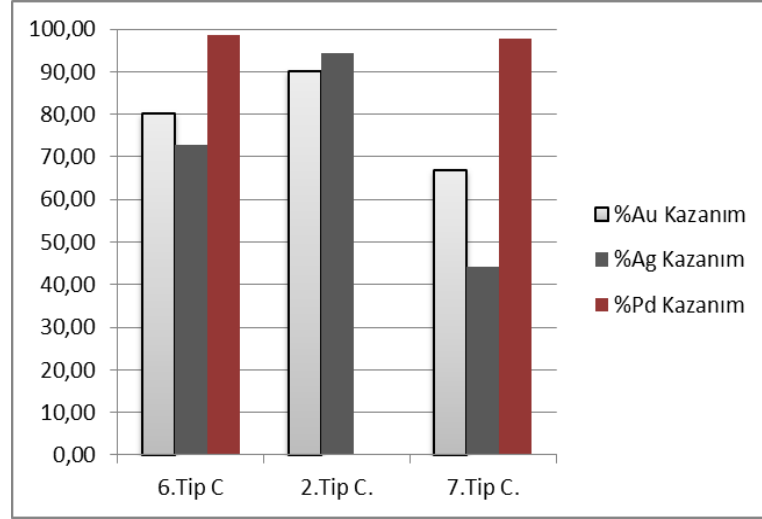
300g curuflaştırıcı ile yapılan diğer deneylerde ise, aynı şekilde 2., 3., 4. ve 5.tip curuflaştırıcılar incelenmiştir. 2.1, 3.3, 4.2 ve 5.2 Numune No'lu deneylerin sonucunda aşağıda verilen grafik (şekil 7.16) elde edilmiştir.



şekil 7.16 300g curuflaştırıcı kullanıldığında curuflaştırıcı bileşiminin %kazanıma etkisi  
Grafikten görüldüğü üzere bakır ilave edilmeden, 300g ile yapılan ergitme işlemlerinde en yüksek %Au kazanımı %95,68 ile 2 ve 3.tip curuflaştırıcılarda, aynı şekilde en yüksek %Ag kazanımı da %98,71 ile bu curuflaştırıcı tipleri kullanıldığında elde edilmiştir.

Bunlara ilave olarak, 2.tip curuflaştırıcı, 6.tip curuflaştırıcı 7. tip curuflaştırıcıların birbirleriyle kıyaslanması incelendiğinde, bakır ilavesi olmaksızın sabit cüruf miktarı 150g olarak yapılan deneyler sonucunda %kazanım değerleri (şekil 7.17) elde edilmiştir.





Şekil 7.17 150g curuflaştırıcı kullanıldığında curuflaştırıcı bileşiminin %kazanıma etkisi

Buna göre, 6.tip curuflaştırıcı ile yapılan deneylerde %Au, %Ag ve %Pd kazanımı sırasıyla %80,24, %72,83 ve %98,65'dir. 2.tip curuflaştırıcı ile yapılan çalışmada ise %90,15 altın kazanımı, %94,28 gümüş kazanımı sağlanmıştır. 7.tip curuflaştırıcı da ise %66,84, %44,15 ve %97,79 miktarlarında %Au, %Ag ve %Pd kazanımı sağlanmıştır. En yüksek altın ve gümüş kazanımı, 2.tip curuflaştırıcıda elde edilmiştir. Buna ilave olarak, 6. ve 7.tip curuflaştırıcılar kullanıldığında %Pd kazanımı açığa çıkmıştır ve bu durum cürufa %1,25 ve %2,21'lik Pd geçtiğini göstermektedir. 2.tip curuflaştırıcıda ise paladyumda herhangi bir kayıp görülmemektedir.

7.2 bölümde verilen %kazanıma curuflaştırıcı miktarının incelendiği deneyler Şekil 7.13 'de görülmüştür ki, ergitme sırasında ilave edilen bakır ve curuflaştırıcı miktarları sabit bir oranda değiştirildiğinde, bu değişim curuflaştırıcı tiplerinin %kazanıma etkisini de değiştirmektedir. Oranın 1 olduğu durumda (5.4) en yüksek %Au kazanımı 4.tip curuflaştırıcı ile elde edilmişken, oranın 2,5 olduğu durumda (5.5) ise 2.tip curuflaştırıcı ile elde edilmiştir. Kullanılan oranın 1 olduğu durumda en yüksek %Ag kazanımı 3. ve 5.tip curuflaştırıcılar ile elde edilirken, oran 2,5 olduğunda 2.tip curuflaştırıcı en yüksek %kazanım değerini vermektedir.

### SONUÇ VE ÖNERİLER

- Ergitme sonucu elde edilen %Au ve %Ag kazanım değerleri, curuflaştırıcı bileşimi açısından incelendiğinde, en yüksek kazanım değerleri, kollektör metal kullanılmadığı durumlarda 2.tip curuflaştırıcı, kollektör metal varlığında ise 5.tip curuflaştırıcı ile elde edilmiştir. Kollektör metal varlığının etkisi 2 ve 3.tip curuflaştırıcılarda kazanıma olumlu etki sağlarken 4 ve 5.tip curuflaştırıcılarda bu mekanizma tersine işlemiş ve verimi düşürmüştür.
- 7. tip curuflaştırıcıda curuflaştırıcı miktarı azaldıkça %kazanım değerleri altın için %79,81'den %66,84'e, gümüş için ise 77,35'den 44,15'e düşmektedir. Bu nedenle, CaF<sub>2</sub> ilaveli curuflaştırıcılarda ergitme sırasında yüksek curuflaştırıcı miktarının şarj edilmesi gerektiği tespit edilmiştir.
- 1. tip curuflaştırıcılarda sabit kolektör metal ve değişken miktarda curuflaştırıcılar kullanıldığında, curuflaştırıcı miktarını arttırmanın %kazanıma etkisinin olumsuz olduğu tespit edilmiştir.
- Çalışmalar sırasında %Au ve %Ag kazanımının en yüksek olduğu değerler altın için %94,79, gümüş için ise %96,96 ile curuflaştırıcı miktarının 200g ve 300g olduğu durumlarda elde edilmiştir.
- Sarj edilen PCB ve curuflaştırıcı miktarının PCB/Curuflaştırıcı oranı, kollektör metal varlığında, geri kazanım değerleri %91,74 Au ve %92,40 Ag olmak üzere 1000:200, kollektör metalin kullanılmadığı ergitme işlemlerinde ise %95,78 Au ve %98,71 Ag olarak 1000:300 oranında elde edilmiştir.

- 3.tip Curuflaştırıcı bileşiminde bulunan SiO<sub>2</sub> miktarının 2.tip curuflaştırıcı bileşimine göre artması, özellikle altın geri kazanımında, %4,67'lik bir artış meydana getirmiştir.
- 4. ve 5.tip curuflaştırıcıların sahip oldukları yüksek baziklik oranı ve kollektör metal olarak kullanılan bakırın ergitme sırasında altın ve gümüşü yapısında absorplaması sonucu kıymetli metal kazanım değerleri, düşük baziklik oranına sahip 2. ve 3.tip curuflaştırıcılara göre, kıymetli metal kazanım değeri artış göstermiştir.
- Ergitme şartlarını etkileyen kollektör metal varlığı, curuflaştırıcı bileşimi ve miktarlarına ait değerlerinin tümü incelendiğinde, PCB numuneleri içerisinde bulunan kıymetli metallerden altının en yüksek geri kazanımı %95,68, gümüşün ise %98,71 olarak gerçekleştirilmiştir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Pongrácz, E., (2002). Re-defining The Concepts of Waste and Waste Management: Evolving the Theory of Waste Management, Academic Thesis, University of Oulu, Department of Process and Environmental Engineering, Finland.
- [2] Robinson, WD., (1996). The Solid Waste Handbook, First Edition, John Willey&Sons Inc., New York .
- [3] İnce, M.Y., (2011). Çevresel Etki Değerler, Uygulamalar ve Çözüm Önerilerine Genel Bir Bakış, <http://www.e-atik.com>, 22 Mart 2012.
- [4] Drechse, C.H., (2006). "Mechanical Process for Recycling Waste Electric and Electronic Equipment with the Rotor Shredder and Rotor Impact Mill", *Aufbereitungs Technik*, 5:47.
- [5] Petranivoka, M., (2008). Treatment of End of Life Computers, Academic Thesis, Faculty of Metallurgy, Department of Non-Ferrous Metals and Waste Treatment Technical University of Kosice, Slovakia.
- [6] Çiftlik, S., Ilgar, M., Handırı, İ. Beyhan, M., Akçil, U., Gönüllü, T., (2009). "Elektrikli ve Elektronik Atıkların Yönetimi, Ekonomisi ve Metal Geri Kazanım Potansiyeli Bakımından Değerlendirilmesi", Türkiye'de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, 15-17 Haziran 2009, İstanbul.
- [7] Menad, N., Björkman, B., Allain, E.G., (1998). "Combustion of Plastics Contained in Electric and Electronic Scrap", *Resources, Conservation and Recycling*, 24:65-85.
- [8] Khang, H.Y.,Schoenung, J.N., "Electronic Waste Recycling: A Review of U.S. Infrastructure and Technology Options", *Resources, Conservation and Recycling*,45(2005):368-400.
- [9] Swedish Enviromental Protection Agency, (2011), Recycling and Disposal of Electronic Waste, Report: 6417, Stockholm.
- [10] Ivanus, R.D., (2010). "Recycling of WEEE", *Metallurgia International*, 15:70-74.

- [11] Aydın, B., (2011). Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıklarının Geri Kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği A.B.D., Isparta.
- [12] Nowosielski, R., Sakiewicz P., (2007). "Recycling Waste and Electronic Equipment", Journal of Achievements Materials and Manufacturing Engineering, 20:535-538.
- [13] Yılmaz, E., (2006). Elektrikli ve Elektronik Atıkların Geri Kazanımı ve Muğla İli Pilot Proje Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği A.B.D., Isparta.
- [14] UNEP, (2009). Recycling from E-Wastes to Resources, DT 1192 PA, Paris.
- [15] Park, Y., Fray, D.J., (2008)."Recovery of High Purity Precious Metals from Printed Circuit Boards", Journal of Hazardous Materials, 164(2009):1152-1158
- [16] Luda, M.P., (2011). Integrated Waste Management, Volume 2, In Tech, Torino.
- [17] Lib, J., Duanb, H., (2012). "Sustainability Evaluation of an E-Waste Treatment Enterprise Based on Emergy Analysis in China Qingbin Songa", Ecological Engineering, 42:223-231.
- [18] Siddique, R., Khatib, J., Kaur, I., (2007). "Use of Recycled Plastics in Concrete: a Review", Waste Management, 28(2008):1835–1852.
- [19] Ministry of Environment & Forests Central Pollution Control Board Delhi, (2008). "Guidelines for Environmentally Sound Management of E-Waste", 23-23/2007-HSMD, Delhi.
- [20] European Commission DG, (2002), "Heavy Metals in Waste", Project ENV.E.3/ETU/2000/0058, Denmark.
- [21] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, (2012). "Geri Kazanım ve Biz", TÜÇEV Atık Yönetimi Sempozyumu, 24-26 Nisan 2012, Antalya.
- [22] Avrupa Çevre Ajansı, (2010)."Avrupa'da Çevre: 2010 Genel Görünüm ve Sentez", TH-31-694-TR-C, Kopenhagen.
- [23] ISO, Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıkları ve Bazı Zararlı Maddelerin Kullanılmasının Sınıflandırılması Direktifleri,  
[http://www.iso.org.tr/tr/web/statiksayfalar/cevre\\_bilgi\\_elektrikli.aspx](http://www.iso.org.tr/tr/web/statiksayfalar/cevre_bilgi_elektrikli.aspx), 18 Şubat 2012.
- [24] Official Journal of the European Union, 2002/96/EC, Directive of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), 27.07.2003, L 37-24.
- [25] Evans, H., Johnson, J., (2005). "Steps Toward RoHS Directive Compliance", International Electronics Manufacturing Initiative,  
[http://thor.inemi.org/webdownload/newsroom/Articles/LeadFree\\_Watch\\_Series/Feb05.pdf](http://thor.inemi.org/webdownload/newsroom/Articles/LeadFree_Watch_Series/Feb05.pdf), 7 Mart 2012.

- [26] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, (2012). "Türkiye'de Atık Yönetimi", TÜÇEV Atık Yönetimi Sempozyumu, 24-26 Nisan 2012, Antalya.
- [27] Varır, A., (2012). "2003'den Bugüne Atık Yönetimi", TÜÇEV Atık Yönetimi Sempozyumu, 24-26 Nisan 2012, Antalya.
- [28] T.C. Resmi Gazete, Atık Elektrikli Ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği, (28300), 22.05.2012.
- [29] Geren, N., (2001). "Endüstriyel Sistemlerde Kullanılan Elektronik Kartların Tamiri"  
<http://www.adanausam.com.tr/icerik/yayin/yayin4.pdf>, 11 Mart 2011.
- [30] Moares, V.T., Espinosa, D.C.R., Tenorio, J.A.S.,(2011). "Recycling of WEEE: Characterization of Spent Printed Circuit Boards from Mobile Phones and Computers", Waste Management, 31(2011):2553-2558.
- [31] Ivanus, R.D., (2010). "A New Environmentally Friendly Method for the Recovery of Useful Materials Through Processing Waste Printed Circuit Boards" Metallurgia International, 1:15-19.
- [32] Williams, P.T., (2010). "Volarization of Printed Circuit Boards from Waste Electrical and Electronic Equipment by Pyrolysis", Waste Biomass Valor, 1(2010):107-120.
- [33] Teller, M.,(2006). "Recycling of Electronic Waste Material", Sustainable Metals Management, 25(2006):563-576.
- [34] Cui, J., Forssberg, E., (2003). "Mechanical Recycling of Waste Electric and Electronic Equipment: a Review", Journal of Hazardous Materials, B99(2003):243-263.
- [35] Vidyadhar, A., Mehrotra, S.P., (2009). "A Nowel Flowsheet for the Recovery of Metal Values from Waste Printed Circuit Boards", Resources, Conservation and Recycling, 53(2009): 464-469.
- [36] Jianzhi, L., Shrivastava, P., Zong, G., Zhang, H.C.,(2004). "Printed Circuit Board Recycling:A State of the Art Survey", IEEE Transactions on the Electronics Packaging Manufacturing, Volume 27,1:33-42.
- [37] Zhang, S., Forssberg, E., (1997). "Mechanical Separation-Oriented Characterization of Electronic Scrap", Resources, Conservation and Recycling, 21(1997): 247-269.
- [38] Zhou, Y., Qiu, K., (2009). "A New Technology for Recycling Materials from Waste Printed Circuit Boards", Journal of Hazardous Materials, 175(2010):823-828.
- [39] Goosey, M., Kellner, R., (2003). "Recycling Technologies for the Threatment of Enf of Life Printed Circuit Boards", Circuit World, 29(2003):33-37.
- [40] Goosey, M., Kellner, R., (2002). "A Scoping Study End-of-Life Printed Circuit Boards" , Department of Trade and Industry, Yorkshire.

- [41] Campbell, J., S., (2003). The Research and Development of an Air Separation Conveyor for Obsolete Electronic Products Recycling, Master Thesis, The Graduate Faculty of Texas Tech University Industrial Engineering Department, Texas.
- [42] Çelik, C., (2007). Elektrik Elektronik Atıklardan Metal Ve Plastik Geri Kazanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Ens. Cevher Mühendisliği Maden ve Kömür Hazırlama A.B.D., İstanbul.
- [43] Li, J., Lu, Hongzhou., Xu, Z., Zhou, Y., (2007). "Recovery Technology for Resources and Products from Waste Printed Circuit Boards", Environmental Science and Technology, Volume 41, 6(2007):1995-2000.
- [44] Delfini, M., Ferrini, M., Manni, A., Massacci, P., Piga, L., (2011). "Optimization of Precious Metal Recovery from Waste Electrical and Electronic Equipment Boards", Journal of Environmental Protection, 2(2011):675-682.
- [45] Hagelüken, C., (2005). "Recycling of Electronic Scrap at Umicore's Integrated Metals Smelter and Refinery", European Metallurgical Conference, 18-21 September 2005, Dresden.
- [46] Manhart, A., (2010). "International Cooperation for Metal Recycling from Waste Electrical and Electronic Equipment", Journal of Industrial Ecology, Volume 15, 1:13-30.
- [47] Zhang, L., Ciu, J., (2008). "Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A Review", Journal of Hazardous Materials, 158(2008):228-256.
- [48] Antrekowitsch, H., Potesser, M., Spruzina, W., Prior, F., (2006). "Metallurgical Recycling of Electronic Scrap", Proceedings of EPD Congress, 12-16 March 2006, 899-908, Texas.
- [49] Meskers, E.M., Spitzbart, M., Salhofer, F., Hagelüken, C., (2009). "Impact of Pre-Processing Routes on Precious Metals Recovery from PCB", European Metallurgical Conference, 28 June-1 July 2009, Innsbruck, Austria.
- [50] Meskers, C.E.M., Van Damme, G., Hagelüken, C., (2009). "Green Recycling of EEE: Special and Precious Metals from EEE". EPD Congress, 15-19 February 2009, California.
- [51] Voisin, L., (2012). Noble Metals- Distribution of Precious Metals During the Reducing Pyrometallurgical Processes of Complex Copper Materials, Chapter 3, Intech, Torino
- [52] Hagelüken, C., (2006). "Improving Metal Returns and Eco-Efficiency in Electronics Recycling"  
<http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/e-scrap/improvingMetalReturnsAndEcoefficiencyInElectronicsRecycling.pdf>, 6 Nisan 2011.
- [53] Lealquiros, E., (2004). "Plasma Processing of Municipal Wastes", Brazilian journal of Physics", 34:1587-1593.

- [54] Murata, M., Takahashi, M., Osada, M., Takashida, S., (2005), "Plasma Melting and Decomposing Technology for Treating PCB-contaminated Wastes", Nippon Steel Technical Report.
- [55] Xuehai, Y., Wang, M., Liu Y., (2009). "Pyrolysis of Scrap Printed Circuit Board Plastic Particles in a Fluidized Bed", *Powder Technology*, 198(2010): 422–428.
- [56] Hall, J.H., Williams, T.,(2007). "Separation and Recovery of Materials from Scrap Printed Circuit Boards", *Resources, Conservation, and Recycling*, vol 51, 3(2007): 691-709.
- [57] Hall, J.H., Williams, T.,(2007). "Processing Waste Printed Circuit Boards for Material Recovery", *Circuit World*, 33:43-50.
- [58] Huang, K., Guo, J., (2008). "Recycling of Waste Printed Circuit Boards: A Review of Current Technologies and Treatment Status in China", *Journal of Hazardous Materials*, 164 (2009): 399–408.
- [59] Zhou, G., Luo, Z., Zhai, X., (2007). "Experimental Study on Metal Recycling from Waste PCB", *Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management*, 5-7 September 2007, Chennai, India.
- [60] Shuey, S.A., Taylor, P., (2005). "Review of Pyrometallurgical Treatment of Electronic Scrap", *Mining Engineering*, 2005:67-70.
- [61] Yazıcı, E.Y., Devenci, H., (2009). E-atıklardan Metallerin Geri Kazanımı. *Madencilik Dergisi*, 48 (3): 3-18.
- [62] Havlik, T., Orac, D., Petranikova, M., Miskufova, A., Kukurugya, F., Takacova Z., (2010). "Leaching of Copper And Tin From Used Printed Circuit Boards After Thermal Treatment", *Journal of Hazardous Materials*, 183(2010): 866–873.
- [63] Biplob, K., Biswas, K., Inoue, K., Ohto, H., Harada, H., Kawakita, A., (2010). "E-Waste Management Through Silver Recovery from Scrap of Plasma TV Monitors", *International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh*, September 2010, Japan.
- [64] Ficeriová, J., Balá, P., Dutková, E., Gockb, E., (2008). "Leaching of Gold and Silver from Crushed Au-Ag Wastes", *The Open Chemical Engineering Journal*, 2(2008):6-9.
- [65] Faramarzia, M., Stagarsa, M., Pensinib, E., Krebsb, W. Brandla, H., (2004). "Metal Solubilization from Metal-Containing Solid Materials by Cyanogenic Chromobacterium Violaceum", *Journal of Biotechnology*, 113(2004):321–326.
- [66] Kim, B.S., Lee, J., Seo, S.P., Park, Y.K., Sohn, H.Y., (2004). "A Process for Extracting Precious Metals from Spent Printed Circuit Boards and Automobile Catalysts", *JOM*, 2004:55-58.
- [67] Kim, B.S., Lee, J., Jeong, L., Kang, S., Lee, K.H., (2009). "A High Temperature Process for Extracting Valuable Metals from Waste Electric and Electronic Scraps (WEES)", *Materials Transactions*, Vol. 50, 6 (2009): 1558-1562.



- [68] Flandineta, L., Tedjara, F., Ghattac, V., Fouletiera, J., (2012). "Metals Recovering from Waste Printed Circuit Boards (WPCBs) Using Molten Salts", *Journal of Hazardous Materials*, 213– 214 (2012): 485– 490.

**A-1 Deney Numuneleri Ağırlıkları, Kollektör Metal, Curuflaştırıcı, Elde Edilen Metal  
ve Curuf Ağırlıkları**

Kollektör Metal İlavesi İle Yapılan Ergitmeler	Numune No	PCB miktarı (g)	Cu miktarı (g)	Curuflaştırıcı miktarı (g)	Elde edilen metal miktarı (g)	Elde edilen curuf miktarı (g)
	1.1	101,45	209,85	100,25	235,10	95,75
	1.2	106,95	317,50	100,10	339,75	121,60
	1.3	110,75	102,00	100,45	130,35	94,15
	1.1	101,45	209,85	100,25	235,10	95,75
	1.4	102,90	205,40	201,40	237,10	195,50
	1.5	100,20	202,15	301,10	236,65	243,75
	2.4	1041,00	300,00	300,00	782,00	368,60
	2.5	1004,00	500,00	200,00	1118,00	279,00
	3.4	1023,90	300,00	300,00	818,50	409,40
	4.4	1021,00	300,00	300,00	772,70	374,60
	5.4	1029,00	300,00	300,00	807,50	394,50
5.5	1001,00	500,00	200,00	1065,00	345,00	

Kollektör Metal İliavesiz Yapılan Ergitmeler	Numune No	PCB miktarı (g)	Cu miktarı (g)	Curuflaştırıcı miktarı (g)	Elde edilen metal miktarı (g)	Elde edilen curuf miktarı (g)
	2.1	0,00	1093,55	300,0	540,20	535,30
	2.2	0,00	1093,20	200,0	513,14	476,40
	2.3	0,00	1082,33	150,0	454,30	370,52
	3.1	0,00	1030,00	200,0	325,70	632,20
	3.2	0,00	930,00	100,0	314,30	507,50
	3.3	0,00	1012,00	300,0	382,40	601,60
	4.1	0,00	1000,20	200,0	492,70	340,60
	4.2	0,00	1010,90	300,0	422,20	540,00
	4.3	0,00	1000,20	400,0	380,75	595,00
	4.1*	0,00	1000,20	200,0	497,70	335,60
	4.2*	0,00	1010,90	300,0	429,00	533,20
	4.3*	0,00	1000,20	400,0	388,60	587,10
	5.1	0,00	1017,00	200,0	408,35	527,60
	5.2	0,00	1000,10	300,0	478,65	581,10
	5.3	0,00	1000,15	400,0	436,10	534,75
	5.1*	0,00	1017,00	200,0	415,35	520,60
	5.2*	0,00	1000,10	300,0	486,04	573,70
	5.3*	0,00	1000,15	400,0	442,10	527,85
	6.1	0,00	1029,00	150,0	461,00	295,10
7.1	0,00	1142,00	413,2	547,00	427,20	
7.2	0,00	1040,00	150,0	471,20	175,00	

## A-2 Metal ve Curuf Fazlarının Elementel Analiz Sonuçları

Deney Numunelerinin Elementel Analiz Sonuçları						
Numune No	Metalik Faz Analizi (ppm)					
	Au	Ag	Pd	Pt	Rh	Cu(%)
1.1	90,61	2116	21,3	0	0	97,3
1.2	80,2	2318	18,85	0	0	95,2
1.3	56,02	2400	25,2	0	0	89,4
1.1	90,61	2116	21,3	0	0	97,3
1.4	55,13	2019	12,11	0	0	92,7
1.5	48,12	2375	19,2	0	0	93,1
2.1	315,8	6670,8	1096,6	0	0	74
2.2	208,6	4338,8	920,6	0	0	79
2.3	249	3106,1	529,6	0	0	84,7
2.4	291,3	403,1	9,37	0	0	83,85
2.5	119,4	773	10,57	0	0	76,32
3.1	298,8	2384	1096,6	0	0	78
3.2	262,4	4069,5	797,8	0	0	83,5
3.3	246,3	2319	570,6	0	0	85,4
3.4	238,3	3348,7	8,91	0	0	73,12
4.1	238	2245,5	25,6	0	0	57,9
4.2	279,8	2486	17,7	0	0	57%
4.3	269,7	2953,3	36,3	0	0	73,15
4.1*	238,9	2249	25,7	0	0	57,9
4.2*	280,2	2489	17,9	0	0	57,3
4.3*	270,1	2965	37	0	0	73,2
4.4	314,3	639,63	17,13	0	0	72,21
5.1	210,3	1313,7	26,6	0	0	75,05
5.2	278,3	1120,7	14,5	0	0	88,75
5.3	221,9	1573	10,9	0	0	73,15
5.1*	211,8	1343,6	28,2	0	0	75,08
5.2*	279,6	1210,9	16,1	0	0	88,9
5.3*	223,4	1587	12,5	0	0	73,2
5.4	259,9	3162,5	21,93	0	0	72,37
5.5	69,8	960,5	3,92	0	0	80,35
6.1	325,9	1450,9	21,93	19,2	0	68,2
7.1	301,6	999	17,5	0	0	73
7.2	219,9	662,5	10,1	0	0	71,6

Deney Numunelerinin Elementel Analiz Sonuçları						
Numune No	Curuf Fazı Analizi (ppm)					
	Au	Ag	Pd	Pt	Rh	Cu(%)
1.1	117	96,2	4,66	0	0	1,9
1.2	132	105,4	3,41	0	0	2,1
1.3	138,9	109,1	1,94	0	0	2,4
1.1	117	96,2	4,66	0	0	1,9
1.4	85,5	91,8	0,82	0	0	1,7
1.5	78,3	108	0,7	0	0	1,4
2.1	14,4	87,7	0	0	0	4,018
2.2	12,3	76,5	0	0	0	3,06
2.3	8,65	70,7	0	0	0	3,85
2.4	98,49	248,78	0	0	0	3,92
2.5	43,09	254,7	0	0	0	3,97
3.1	28,4	96	0	0	0	2,65
3.2	8,5	50,5	0	0	0	2,98
3.3	7	81	0	0	0	3,64
3.4	60,7	241,2	0	0	0	4,26
4.1	101,3	358,6	0	0	0	4,75
4.2	88,1	508,9	0	0	0	3,16
4.3	144,2	439	0	0	0	4,93
4.1*	101,3	358,6	0	0	0	4,75
4.2*	88,1	508,9	0	0	0	3,16
4.3*	144,2	439	0	0	0	4,93
4.4	62,6	190,17	0	0	0	2,78
5.1	113,8	612,5	0	0	0	7,88
5.2	139	698	0	0	0	4,97
5.3	177,4	619,1	0	0	0	3,72
5.1*	113,8	612,5	0	0	0	7,88
5.2*	139	698	0	0	0	4,97
5.3*	177,4	619,1	0	0	0	3,72
5.4	58	308	0	0	0	3,56
5.5	25,97	310,3	0	0	0	4,08
6.1	125,1	846,8	6,54	0	0	7,01
7.1	97,7	374,5	0	0	0	3,21
7.2	293,7	2256,3	7,4	0	0	10,51

### A-3 Metaldeki ve Curuftaki Kıymetli Metal Oranları

Numune No	Metalik fazdaki kıymetli metal miktarı/Curuf fazındaki kıymetli metal miktarı		
	M-Au/C-Au	M-Ag/C-Ag	M-Pd/C-Pd
1.1	1,90	54,02	11,22
1.2	1,70	61,47	15,44
1.3	0,56	30,46	17,98
1.4	0,78	26,68	17,91
1.5	0,60	21,36	26,63
2.1	22,13	76,76	*
2.2	18,27	61,09	*
2.3	9,15	16,47	*
2.4	6,32	3,43	*
2.5	11,11	12,16	*
3.1	5,42	12,79	*
3.2	19,06	49,88	*
3.3	22,37	18,20	*
3.4	7,86	31,86	*
4.1	3,50	9,30	*
4.2	2,56	3,94	*
4.3	1,24	4,47	*
4.4	10,34	6,93	*
5.1	1,48	1,75	*
5.2	1,70	1,47	*
5.3	1,05	2,15	*
5.4	9,17	21	*
5.5	8,29	9,56	*
6.1	4,06	2,68	46,31
7.1	3,95	3,42	*
7.2	2,02	0,79	3,91

#### A-4 Kıymetli Metal % Kazanım Miktarları

Numune No	%Au Kazanım	%Ag Kazanım	%Pd Kazanım
1.1	65,54	98,18	98,99
1.2	62,93	98,40	98,99
1.3	35,83	96,82	98,98
1.4	43,88	96,39	98,97
1.5	37,37	95,53	98,96
2.1	95,68	98,71	*
2.2	94,81	98,39	*
2.3	90,15	94,28	*
2.4	86,34	77,43	*
2.5	91,74	92,40	*
3.1	84,42	92,75	*
3.2	95,01	98,03	*
3.3	95,72	94,79	*
3.4	88,71	96,96	*
4.1	77,77	90,29	*
4.2	71,90	79,74	*
4.3	55,36	81,72	*
4.4	91,18	87,39	*
5.1	59,76	63,64	*
5.2	58,02	59,51	*
5.3	51,33	68,22	*
5.4	90,17	95,45	*
5.5	89,24	90,53	*
6.1	80,24	72,83	98,65
7.1	79,81	77,35	*
7.2	66,84	44,15	97,79

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Özlem ATASOY KOCATÜFEK  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 06.02.1984 Şişli  
**Yabancı Dili** : İngilizce, Almanca  
**E-posta** : ozlematasoy@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2008
Lise	Fen-Matematik	Lüleburgaz Anadolu Lisesi	2002

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010-2011	İstanbul Altın Rafinerisi A.Ş.	Üretim Şefi
2008-2010	İstanbul Altın Rafinerisi A.Ş.	Üretim Mühendisi