T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK ATIKLARDAN KİMYASAL YÖNTEMLERLE DEĞERLİ METALLERİN GERİ KAZANIMI"

Pelin ONAY

DANIŞMAN
Doç. Dr. Serdar AYDIN

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma 09.07.2019 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Doç. Dr. Serdar AYDIN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. H. Kurtuluş ÖZCAN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Ali Rıza DİNÇER
Namık Kemal Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin..... numaralı projesi ile desteklenmiştir.
Bu tez, ... numaralı ..... projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların geri dönüşümü hakkında bilgi vermek ve önemi hakkında farkındalık yaratmak amaçlanmıştır. Çalışma konumun belirlenmesi, çalışmanın hazırlanma sürecinin her aşamasında bilgi, tecrübe ve zamanını esirgemeyerek bana her fırsatta güleryüzü ve samimiyeti ile yardımcı olan değerli danışmanım Doç Dr. Serdar Aydın'a, analizleri yaparken her aşamasında destek olan. **Dr. Sinan Güneysu** hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda analiz yapabilecek kaynak sağlayan, tez yazım esnasında benden sevgisini, ilgisini, emeğini eksik etmeden en büyük desteği ve güveni veren sevgili eşim Haluk Onay'a, beni bu günlere getirerek yüksek lisans yapmaya teşvik eden, maddi ve manevi her zaman destekleyen, bu hayattaki en büyük şansım olan aileme sonsuz teşekkürler.

Temmuz 2019 Pelin ONAY

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **ix**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xii**
SUMMARY ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **2**
2.1. ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYA (EEE) NEDİR? 2
2.2. ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYA (AEEE) NEDİR? 3
2.2.1. AEEE'lerin Bileşimi 3
2.2.2. AEEE'lerin Çevre ve İnsan Sağlığına Etkileri 4
2.2.3. AEEE'lerin Ekonomik Değeri 6
2.3. AVRUPA'DAKİ MEVZUAT VE UYGULAMALAR 11
2.3.1. Avrupa Ülkelerinde İyi Uygulama Örnekleri 12
2.3.2. Türkiye'deki Mevcut Durum 14
2.3.3. Türkiye'de AEEE Kapsamında İlgili Paydaşlar 16
2.4. ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYALARIN YÖNETİMİ 17
2.4.1. Önleme 18
2.4.2. Kaynakta Azaltma 18
2.4.3. Yeniden Kullanım 19
2.4.4. Geri Dönüşüm 20
2.5. ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYALARIN (AEEE) GERİ KAZANIMI 20
2.5.1. Geri Kazanım Teknikleri 21
Hidrometalurjik Geri Kazanım Yöntemi *21*
Pirometalurjik Geri Kazanım Yöntemi *22*
Elektrokimyasal Geri Kazanım Yöntemi *23*
Biyokimyasal Geri Kazanım Yöntemi *23*

2.5.2. Bertaraf Yöntemleri 24
3. MALZEME VE YÖNTEM 25
3.1 MALZEME 25
3.1.1. Elektronik Atıklar 25
3.1.2. Kimyasallar 25
3.2. YÖNTEM 25
3.2.1. Mekanik Sökme - Ayırma 26
3.2.2. Fiziksel Olarak Ayrılabilen Metal Kısımların Ayrılması 26
3.2.3. Hidrometalurjik Yöntem 26
3.3. ANALİZLER 32
4. BULGULAR 33
4.1. ELEKTRONİK ATIKLARIN BİLEŞİMİNİN BELİRLENMESİ 33
4.1.1. Cep Telefonu-1 33
4.1.2. Cep Telefonu-2 35
4.1.3. Cep Telefonu-3 36
4.1.4. Dizüstü Bilgisayar 38
4.1.5. Masaüstü Bilgisayar 40
4.1.6. Yazıcı 42
4.1.7. Tüplü Televizyon 44
4.2. ELEKTRONİK ATIKLARIN BİLEŞİMİNİN KARŞILAŞTIRILMASI 47
4.3. CPU, BOARD VE KONEKTÖRLERDEN KRAL SUYU İLE ALTIN GERİ KAZANIMI 48
4.3.1. Boardlar 48
2.1.1.1. Board 1 49
2.1.1.2. Board 2 49
2.1.1.3. Board 3 49
2.1.1.4. Board 4 50
4.3.2. CPUlar 50
4.3.3. Konektörler 53
4.4. EKONOMİK ANALİZ 54
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 58
KAYNAKLAR 61
EKLER 63
ÖZGEÇMİŞ 64

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. : AEEE'lerin İnsan Vücuduna Etkileri. 6

Şekil 2.2. : TÜBİSAD Yetkilendrilmiş Kuruluşu Tarafından Toplanan AEEE'lerin Hurda Değeri ve Geri Dönüşüm İşlemi Sonrası Değerli Metal Karşılaştırması. (Tanner, 2019) 7

Şekil 2.3. : Cevher ile E-atık sonucundaki altın kazanımlarının karşılaştırılması. 8

Şekil 2.4. : TÜBİSAD Yetkilendirilmiş Kuruluşu Tarafından Toplanan AEEE'lerin Değerli Metal Hesabı. (Tanner, 2019).....8

Şekil 2.5. : 2014 Yılında Dünya'da oluşan AEEE Miktarı. 9

Şekil 2.6. : Dünya'da oluşan AEEE miktarı (Tanner, 2019). 10

Şekil 2.7. : 2014 yılı kişi başına düşen AEEE miktarları. 11

Şekil 2.8. : Atık yönetimi hiyerarşisi. 18

Şekil 2.9. : AEEE Geri Dönüşüm Prosesi. 19

Şekil 3.1. : Kral suyu ve hazırlanması. 28

Şekil 4.1. : Cep Telefonu-1 ve Demontaj Aşamaları 33

Şekil 4.2. : Cep Telefonu-1 analiz sonuçları 34

Şekil 4.3. : Cep Telefonu-2 ve Demontaj Aşamaları 35

Şekil 4.4. : Cep Telefonu-2 analiz sonuçları 36

Şekil 4.5. : Cep Telefonu-3 ve demontaj aşamaları 36

Şekil 4.6. : Cep Telefonu-3 analiz sonuçları 37

Şekil 4.7. : Dizüstü Bilgisayar ve Demontaj Aşamaları. 38

Şekil 4.8. : Dizüstü Bilgisayar analiz sonuçları 40

Şekil 4.9. : Masaüstü Bilgisayar ve Demontaj Aşamaları.....41

Şekil 4.10. : Dizüstü Bilgisayar analiz sonuçları 42

Şekil 4.11. : Yazıcı ve Demontaj Aşamaları 43

Şekil 4.12. : Lazer yazıcı analiz sonuçları.....44

Şekil 4.13. : Televizyon Demontaj Aşamaları. 45

Şekil 4.14. : Tüplü Televizyon analiz sonuçları.....46

Şekil 4.15. : Çeşitli elektronik atıkların bileşiminin karşılaştırılması.....47

Şekil 4.16. : Board (1) görünüşü 49

Şekil 4.17. : Board (2) görünüşü 49

Şekil 4.18. : Board (3) görünüşü 49

Şekil 4.19. : Board (4) görünüşü 50

Şekil 4.20. : CPU (5) görünüşü ve işlemleri. 51

Şekil 4.21. : CPU (6) görünüşü ve işlemleri. 51

Şekil 4.22. : CPU (7) görünüşü ve işlemleri. 51

Şekil 4.23. : CPU (8) görünüşü ve işlemleri. 52

Şekil 4.24. : CPU (9) görünüşü ve işlemleri 52

Şekil 4.25. : CPU (10) görünüşü ve işlemleri 52

Şekil 4.26. : Konektör görünüşü 53

Şekil 4.27. : CPU, Devre Kartı, Konektörlerin Geri Kazanımından Elde Edilen Altın Miktarı 55

Şekil 4.28. : AEEE'lerin Aylık Bedelleri.....56

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. : AEEE'ler içerisindeki Elementler. 4

Tablo 2.2. : AB Ülkeleri EEE Miktarı ve AEEE Toplama Yüzdeleri. (TÜBİSAD, 2016) 14

Tablo 2.3. : E-atıkların Geri Dönüşümünde Kullanılan İşlemler. (Yazıcı ve Deveci, 2009).....24

Tablo 3.1. : Kral suyu deneylerinde kullanılan kimyasal miktarları. 27

Tablo 4.1. : Cep Telefonu-1 Analiz Sonuçları.....34

Tablo 4.2. : Cep Telefonu-2 Analiz Sonuçları.....35

Tablo 4.3. : Cep Telefonu-3 Analiz Sonuçları.....37

Tablo 4.4. : Dizüstü bilgisayar Analiz Sonuçları.....39

Tablo 4.5. : Masaüstü Analiz Sonuçları. 41

Tablo 4.6. : Yazıcı Analiz Sonuçları. 43

Tablo 4.7. : Tüplü Televizyon Analiz Sonuçları. 45

Tablo 4.8. : Genel Analiz Sonuçları. 47

Tablo 4.9. : ICP-MS Analiz Sonuçları. 48

Tablo 4.10. : Board Analiz Sonuçları. 50

Tablo 4.11. : CPU Analiz Sonuçları. 53

Tablo 4.12. : Geri Kazanım Süreci İçin İşletme Birim Maliyetleri 54

Tablo 4.13. : Hidrometalurjik Yöntem İçin Aylık Gider Analizi 57

Tablo 4.14. : Hidrometalurjik Yöntemlerle Geri Kazanılan Altın Gelir Analizi 57

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

∑ : Toplam
+ : Toplama İşlemi
% : Yüzde
$: Dolar

Kısaltmalar **Açıklama**

AB : Avrupa Birliği
AEEE : Atık Elektrikli ve ElektronikEşya
Ag : Gümüş
Au : Altın
Ba : Baryum
Be : Berilyum
BFR : Bromlu Alev Geciktiriciler
ºC : Santigrat Derece
Cd : Kadmiyum
CPU : Cental Processing Unit
Cr : Krom
CRT : Cathode Ray Tube
Cu : Bakır
ÇŞB : T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
DNA : Deoksiribo Nükleik Asit
E-Atık : Elektronik Atık
EEE : Elektrikli ve Elektronik Eşya
Gr : Gram
H_2SO_4 : Sülfürik Asit
HCl : Hidroklorik Asit
Hg : Civa
ICP-MS : Inductively Coupled Plasma Mass Spectromer
Kg : Kilogram

Kw : Kilowatt

L : Litre

MM : Mili Metre

NH_4OH : Amonyum Hidroksit

NaOH : Sodyum Hidroksit

P : Fosfor

PCB : Printed Circuit Board

Pd : Paladyum

Pb : Kurşun

Ph : Power of Hydrogen

Ppb : Part Per Billion

Pt : Platin

RAEE : Centro Di Coordinamento

RoHs : Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances

Tv : Televizyon

TÜBİSAD : Bilişim Sanayicileri Derneği

WEEE : Waste Electrrcal and Electronic Equipment

YK : Yetkilendirilmiş Kuruluş

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK ATIKLARDAN KİMYASAL YÖNTEMLERLE DEĞERLİ METALLERİN GERİ KAZANIMI

Pelin ONAY

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr.Serdar AYDIN

II. Danışman :UnvanAd SOYAD

Teknolojinin günümüzde hızla gelişmesiyle elektrikli ve elektronik eşya çeşitliliği artmakta ve tüketicilere sunulan bu eşyaların faydalı kullanım ömürleri, cihazların özellik ve kapasitelerindeki hızlı değişimlere paralel olarak kısalmaktadır. Üreticiler tarafından piyasaya arz edilen elektrikli ve elektronik eşyaların hızlı artışı ile meydana gelen atık elektrikli ve elektronik eşyalar da bu oranda artmıştır. Artan atık elektrikli ve elektronik eşyaların içerdiği toksik metallerin çevreye ve insana zararlarını engellemek, içerisinde ihtiva ettikleri değerli metalleri elde edebilmek ve sürdürülebilirlik bir gelecek için bu atıkların geri kazanımı son derece önemlidir.

Bu çalışmada atık elektrikli ve elektronik eşyalardan kimyasal yöntemlerle değerli metallerin geri kazanımı üzerinde durulmuş olup elektrikli ve elektronik eşyalar ile atık elektrikli ve elektronik eşyaların detaylı tanımı yapılarak çalışmaya başlanmıştır. Atık elektrikli ve elektronik eşyalar ile ilgili çeşitli ülkeler incelenmiş, çevreye ve canlı sağlığına etkisi irdelenmiştir. İhtiva ettiği değerli metaller ve üretim sürecinde ikincil hammadde olarak

kullanılabilirliği araştırılan bu çalışma ile çeşitli atık elektrikli ve elektronik eşyaların önce fiziksel sökme ve ayrıştırma daha sonra değerli metal geri kazanımı için kimyasal işlemler uygulanarak bu atık elektrikli ve elektronik eşyaların içerisindeki değerli metal miktarları belirlenmiştir.

Bu çalışma, atık elektrikli ve elektronik eşyaların geri kazanım işlemlerinin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesinin çevre ve canlı sağlığına olumlu etkileri ile ekonomik olarak aslında bir atık değil hammadde olduğunu göstermiştir.

Temmuz 2019, 78 sayfa.

Anahtar kelimeler: AEEE, Geri Kazanım, Değerli Metal

SUMMARY

M.Sc. THESIS

RECYCLING OF PRECIOUS METALS BY CHEMICAL METHODS FROM ELECTRONIC WASTES

Pelin ONAY

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr.Serdar AYDIN

Co-Supervisor :Academic TitleName SURNAME

Nowadays, Electrical and electronical items diversity has increased and these items offered to the consumers, economic life has became shorter in line with the fast changes in the items features and capacities with the recent developments in technology. In addition to this, there is an increase in electric and electronic items waste in parallel with the same increase rate.

In order to prevent the harms of the electric and electronic waste contained toxic materials to the human life and the environment and obtain precious metals by distilling waste and for sustainable future, recycling is so important.

In this thesis, distilling the electric and electronical waste by chemical methods for recycling has been assessed beginning with detailed definitions of electric, electronical items and wastes.

Some countries has been evaluated regarding electric and electronics and the effects of the wastes to the human life and environment has been examined.

This thesis shows that recycling the waste of electric and electronic items in a productive way has positive effects to the human life, environment. From eceonomic perspective in fact it is not waste, it is raw material.

July 2019,78.pages.

Keywords: WEEE, Recycling, Precious Metals

1. GİRİŞ

Dünya son yüzyılda hızla gelişmekte ve teknolojik ürünler bu gelişmede büyük rol oynamaktadır. Son yüzyıl teknoloji çağı olarak tanımlanmakta ve teknolojik aletler hayatımızın her alanına temas etmektedir. İlk uygulamalarda yaşamın içerisinde yer alan teknolojinin günümüzde yaygın kullanılan sensörler ve cihazlar ile sürekli olarak kontrol edilebilen bir teknolojik yaşama dönüştüğünü görmekteyiz. Teknolojinin bu denli hızlı gelişmesi yaşam alanlarımızdaki Elektrikli ve Elektronik Eşya (EEE) kullanım oranın ve sirkülasyonun artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla bu hızlı artış Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE)' da artması anlamına gelmektedir.

Sınırlı doğal kaynaklar ve değerli madenler kullanılarak üretilen bu eşyaların tekrar kullanımı, geri kazanımı ve geri dönüşümü de dünyamızın geleceği için oldukça önemlidir. Elektrikli ve Elektronik Eşya üretiminde kullanılan altın, gümüş, paladyum, bakır, kalay ve çinko gibi metallerin sınırlı kaynakları tükenmekte ve sürdürülebilir üretim konusunda sorunlar beklenmektedir. Buna ilave olarak, AEEE'ler geri dönüştürülmediğinde yeni üretimlerde doğal hammadde kaynakları kullanımının yüksek olması nedeniyle EEE'lerin maliyetleri artmaktadır.

Ayrıca geri dönüştürülmeyen AEEE'ler çevre ve insan sağlığı için tehlike arz etmektedir. Özellikle AEEE'ler içerisindeki iz metaller; civa, kurşun, krom, kadmiyumun canlılar için büyük risk oluşturması mümkündür. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların mevzuatlara uygun bir şekilde geri dönüştürülmesi ve değerli metallerin geri kazanımı ile atık minimizasyonu gerçekleştirilmektedir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1.ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYA (EEE) NEDİR?

AEEE'lerin Kontrolü Yönetmeliği Ek:1-A'da yer alan kategoriler içerisinde bulunan ve alternatif akımla 1.000 (bin) Volt'u, doğru akımla ise 1.500 (binbeşyüz) Volt'u geçmeyecek şekilde kullanım amacıyla tasarlanmış olan, çalışması için elektrik akımına ve/veya elektromanyetik alana bağlı olan eşyalar ile bu akım ve alanların üretimini, transferini ve ölçümüne yarayan eşyalara EEE (Elektronik ve Elektrikli Eşya) denilmektedir. (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012)

Günümüzde günlük hayatımızın vazgeçilmezlerinden olan ve yaşamımızı kolaylaştıran ürünlerin çoğunluğunu oluşturan elektrikli ve elektronik eşyalar, üretim aşamasında da yine aynı şekilde elektronik ve elektrikli eşyaların daha karmaşık türlerine ihtiyaç duymaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte kullanmaktan vazgeçemeyeceğimiz dizüstü bilgisayar, televizyon, cep telefonları, akıllı saatler, yazıcılar, kablosuz iletişim araçları, ses ve görüntü kayıt cihazları, x-ray cihazları, mikrodalga cihazlar, beyaz eşya grubundaki diğer ürünler, küçük ev eşyaları, otomatlar vb. birçok çeşidi bulunan ürünler EEE olarak tanımlanmaktadır.

AEEE'lerin Kontrolü Yönetmeliğinin Ek1-A'sın da yer alan EEE kategorileri aşağıdaki gibidir;

1. Büyük ev eşyaları
2. Küçük ev aletleri
3. Bilişim, telekomünikasyon eşyaları
4. Tüketici eşyaları
5. Aydınlatma cihazları
6. Elektrikli ve elektronik eşyalar (büyük ve sabit sanayi ekipmanları hariç)
7. Oyuncaklar, eğlence ve spor eşyaları
8. Tıbbi sağlık cihazları
9. İzleme, ölçme ve kontrol eşyaları
10. Otomatlar

(T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012)

2.2. ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYA (AEEE) NEDİR?

Kullanan kişi için kullanım değeri son bulmuş ve/veya kullanılmaz halde olan hasarlanmış, kırık, bozuk, tamir edilemez olarak ömrü tamamlanan elektrikli ve elektronik ekipman ve aletlerin tümüne AEEE denilmektedir.

AEEE Yönetmeliğine göre ise; 02.04.2015 tarih ve 29314 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği'n de atık (Atık Yönetimi Yönetmeliği Madde 4 d bendi Atık: Üreticisi veya fiilen kendisinde bulunduran gerçek ve/veya tüzel kişi tarafından doğaya atılan veya bırakılan ya da atılması zorunlu olan herhangi bir madde veya materyali, tanımlamaktadır.) tanımına uyan ve Ek1-A'da tanımlanan kategorilerde bulunan ürünlerin kullanım süresi tamamlandığı andaki tüm bileşenlerini, unsurlarını ve içerdiği sarf malzemelerini kapsamaktadır. (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012)

AEEE'lerin Kontrolü Yönetmeliği'nde belirtildiği üzere AEEE'lere ait Kategoriler aşağıda sıralanmıştır;

1. Buzdolapları - Soğutucular ve İklimlendirme Eşyaları
2. Büyük Beyaz Ev Eşyaları (Buzdolapları – soğutucular ve iklimlendirme eşyaları hariç)
3. Tv ve Monitörler
4. Bilişim, Telekomünikasyon ve Tüketici Eşyaları (Tv ve Monitörler hariç)
5. Aydınlatma Cihazları
6. Küçük Ev Eşyaları ile Elektrikli ve Elektronik Eşyalar
7. Oyuncaklar, Spor ve Eğlence Ekipmanları
8. İzleme, Ölçme ve Kontrol Ekipmanları

(T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012)

2.2.1. AEEE'lerin Bileşimi

EEE'ler içerisinde 60'ın üzerinde farklı element ve malzeme bulunabilmektedir. Bu element ve malzemeler çoğunlukla değerli metaller (paladyum, gümüş, altın), temel ve özel metaller (çinko, alüminyum, bakır, nikel, demir), toksik ve/veya tehlikeli metaller (kadmiyum, berilyum, cıva), halojenler (bromür, klor vb.), plastik bileşenler, cam ve seramik olarak sınıflandırılmaktadır. EEE' ların ağırlığının %80'den fazlası plastik, demir, alüminyum ve cam dan meydana gelmektedir. Değerli metaller ile toksik malzemeler çok az miktarlarda

bulunmalarına rağmen oldukça büyük bir öneme sahiptir. Platin, Paladyum, Gümüş, Altın, bakır gibi element ve metaller AEEE'lerin geri dönüşüm sürecini kazançlı bir iş haline getiren değerli metaller olarak görülmektedir. Bu metal ve elementlere ek olarak indiyum ve galyum gibi nadir bulunan toprak elementleri de yeni teknolojik uygulamalarda kullanılmaları nedeniyle bu element ve metalleri ihtiva eden AEEE'lerin geri dönüşümü önem kazanmaktadır.

Tablo 2.1. : AEEE'ler içerisindeki Elementler.

MALZEME	BÜYÜK EV ALETLERİ	KÜÇÜK EV ALETLERİ	BİLİŞİM TELEKOMÜNİKASYON VE TÜKETİCİ EKİPMANLARI	AYDINLATMA EKİPMANLARI
Demir İçeren Metal	43	29	36	0
Alüminyum	14	9,3	5	14
Bakır	12	17	4	0,22
Kurşun	1,6	0,57	0,29	0
Kadmiyum	0,0014	0,0068	0,018	0
Civa	0,000038	0,000018	0,00007	0,02
Altın	0,00000067	0,00000061	0,00024	0
Gümüş	0,0000077	0,000007	0,0012	0
Paladyum	0,0000003	0,00000024	0,00006	0
İndiyum	0	0	0,0005	0,0005
Bromlu Plastikler	0,29	0,75	18	3,7
Plastikler	19	37	12	0
Kurşunlu Cam	0	0	19	0
Cam	0,017	0,16	0,3	77
Diğer	10	6,9	5,7	5
Toplam	100	100	100	100

Bazı AEEE Kategorilerinin Bileşimi (%)

2.2.2. AEEE'lerin Çevre ve İnsan Sağlığına Etkileri

AEEE'ler içerdiği bazı zararlı ve tehlikeli elementler nedeniyle çevre ve insan sağlığı üzerinde risk teşkil ettiği bilinmektedir. Örneğin;

Kurşun (Pb): Tv-Monitörlerde bulunan C.R.T. tüpleri, lehimler, entegre devreleri, akü gibi birçok elektronik eşyada kullanılan kurşunun zararları 1970 de gazyağı ile tespit edilmiştir. Sinir sisteminde, kan dolaşımında, böbrekler ve üreme sistemlerinde büyük hasara sebep olabilen kurşunun çocukların beyin ve zihin gelişimine de olumsuz etkileri olduğu kanıtlanmıştır. Atık sahalarındaki kurşunun %40' ı ve ağır metallerin %70' i AEEE'lerden kaynaklanmaktadır. TV ve Monitör ağırlığının %20' si Kurşun içerir. Her bilgisayar yaklaşık 2 ile 4 kg kurşun içermektedir. Atık sahalarındaki kurşun yeraltı ve/veya yerüstü sularına karışabilmektedir. (Akın ve Kuru, 2013)

Civa (Hg): Civa, böbrek, beyin ve özellikle ceninlere zarar verebilecek tehlikeli bir maddedir. Özellikle yüksek dozajda Hg'ya maruz kalan ceninler için son derece tehlikeli olan madde, yeraltı ve/veya yer üstü sularına karıştığı taktirde tüm canlı organizmalara özellikle de balıklara kolayca yerleşebilmektedir. Her yıl Dünya'daki Hg tüketiminin %22' si elektronik eşya yapımında kullanılmaktadır. Hg'ya pillerde, tıbbi cihazlarda, aydınlatma ekipmanlarında, termostatlarda, sensörlerde ve cep telefonlarında sıkça rastlanılmaktadır. Hg düşük dozajlarda bile tehlikeli ve zehirlidir. (Akın ve Kuru, 2013)

Bromlu Alev Geciktiriciler (BFR): Canlılarda normal gelişim süreci için hormonal fonksiyonları önemli ölçüde etkiler. Plastik malzemelerde alev geciktirici olarak kullanılırlar. İşyeri ve ofislerdeki bilgisayarlar üzerindeki tozlarda, bilgisayar bağlantı ekipmanlarında, plastiklerde, basılı devre kartlarında, kablolarda bulunmaktadır. Düşük sıcaklıklarda yakılması sonucunda çok zehirli atıklar oluşturmaktadır. (Akın ve Kuru, 2013)

Fosfor.(P): P özellikle C.R.T. li Monitör ve Tv ekranlarında görsellerin çözünürlük ve aydınlığı için kullanılan inorganik bir kimyasaldır. C.R.T. tüpün ve bu ekranların camlarının iç yüzünü kaplamak için kullanılmaktadır. Kırılan tüpten oluşan tozların solunması, saçılan cam parçalarına dokunulması canlılar için oldukça risklidir. (Akın ve Kuru, 2013)

Baryum.(Ba): Yumuşak ve beyaz bir metal olan Ba, kullanıcıları tarafından radyasyondan korumak amacıyla bilgisayarların ön yüzeyinde kullanılmaktadır. Baryuma kısa süreli maruz kalmak iç organlarda, kaslarda ve beyinde hasara sebep olabilmektedir. (Akın ve Kuru, 2013)

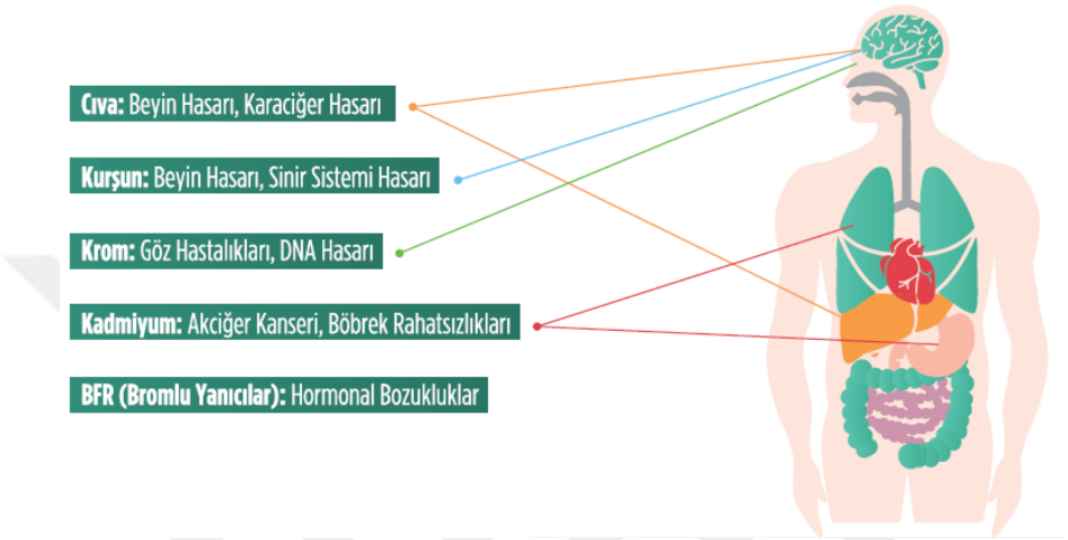
Krom.(Cr^{+6}): Çeşitli metal ve ekipmanlar üzerinde kaplama olarak bulunmaktadır. Korozyon koruması ve işlenmiş galvaniz çelik levha ve sertleştirilmiş çelik içinde kullanılır. Cr^{+6}, DNA hasarı, astım ve bronşite sebep olmaktadır. (Akın ve Kuru, 2013)

Berilyum.(Be): Ana kart ve bağlantı ekipmanlarında bulunur. Son zamanlarda kanserojen olarak değerlendirilmektedir. (Akın ve Kuru, 2013)

Kadmiyum (Cd): Bilgisayar içerisindeki çiplerde ve infra-red sistemlerinde, plastiklerde stabilizatör olarak vb. kullanılmaktadır. Eski tip CRT tüpleri ve piller kadmiyum içermektedir.

Kadmiyum böbreklerde birikerek zehirlenme ve kırılgan kemiklere neden olmaktadır. (Akın ve Kuru, 2013)

AEEE'lerin insan vücuduna bazı olumsuz etkileri Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. : AEEE'lerin İnsan Vücuduna Etkileri.

2.2.3. AEEE'lerin Ekonomik Değeri

AEEE'lerin geri dönüşümü ekonomik kârlılığın artırılması için son derece önemlidir. Geri dönüşüm ve sürdürülebilir ekonomik kalkınma kavramları arasındaki ilişkinin akıcı ve sistematik devamlılığının sağlanabilmesi için öncelikle gereksiz atık oluşumunun engellenmesi, üretimlerin en az atık oluşturma felsefesiyle gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bundan sonraki aşamalarda da kurulan geri dönüşüm tesislerinde atıkların ekonomiye tekrar döndürülerek ekonomik bir varlık halinde girdi yaratması gerekmektedir. Gelir seviyesi yüksek olan toplumlarda AEEE'lerin geri kazanım oranında yükse olduğu bilinmektedir.

AEEE'lerin geri dönüştürülebilir olmasının toplum tarafından algılanması, toplumun tüketim davranışlarıyla doğrudan ilgilidir. Özellikle bilişim ve iletişim teknolojilerindeki hızlı artış AEEE'lerin oranını hızla artırmıştır. AEEE'lerin bu yükselişi yapılacak yatırımların AEEE geri dönüşüm tesislerinin kurulması ve bu noktada atıl bir pazarın varlığının açığa çıkarılması

açısından etkili olmuştur. AEEE Geri dönüşüm tesis yatırımları istihdam sağlama açısından da ekonomik bir etkinliğin göstergesidir. (Hobikoğlu, 2013)

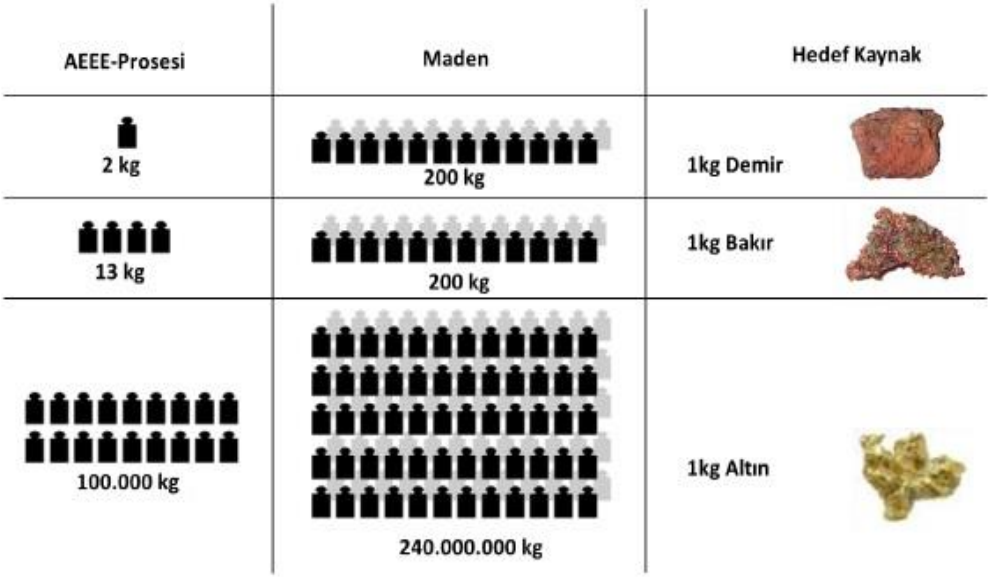


Şekil 2.2. : TÜBİSAD Yetkilendrilmiş Kuruluşu Tarafından Toplanan AEEE'lerin Hurda Değeri ve Geri Dönüşüm İşlemi Sonrası Değerli Metal Karşılaştırması. (Tanner, 2019)

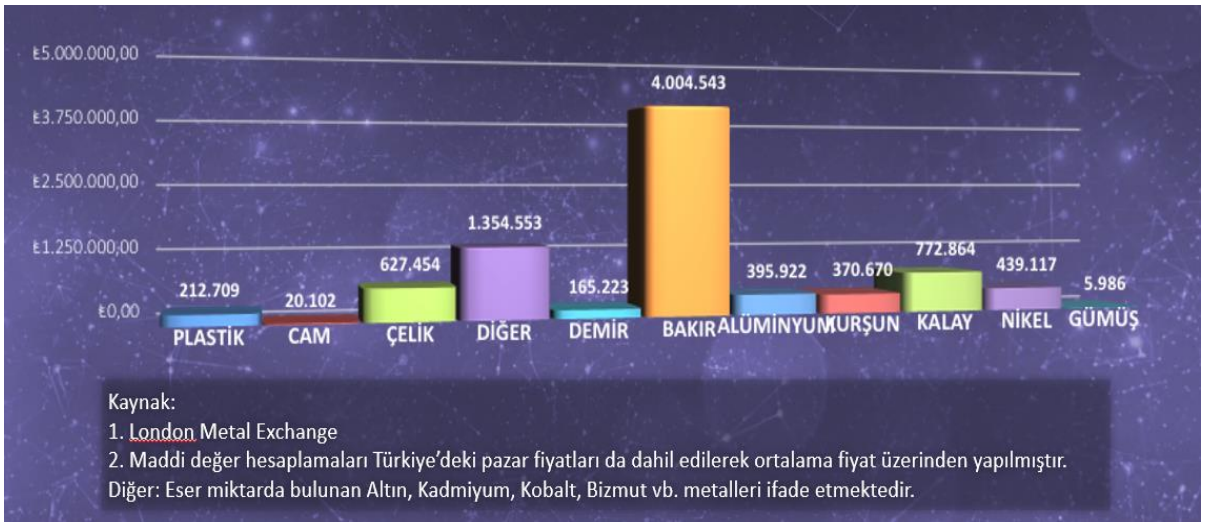
TÜBİSAD Yetkilendirilmiş Kuruluşu tarafından 2016 yılından itibaren toplanan AEEE' ler üzerinde gerçekleştirilen bir araştırmaya göre; AEEE'lerin yalnızca hurda olarak değerlendirilip içerisindeki değerli metalleri kazanmadan elde edilen hurda değeri ile geri dönüşüm tesislerinde tam anlamıyla değerli metallerinin de kazanılması sonrasında oluşan katma değer farkının analizi yapılmıştır. Şekil 2.2' de göstermektedir ki AEEE'lerin tam anlamıyla geri dönüştürülmesi sonucunda elde edilen katma değer %100 fark yaratmaktadır. Bu araştırmada AEEE işleme ve geri dönüşüm tesislerinin önemi daha net bir şekilde anlaşılmaktadır. (Tanner, 2019)

AEEE'ler ihtiva ettiği değerli metaller ve elementler sebebiyle ekonomik açıdan son derece büyük önem taşımaktadır. Örneğin bir bilgisayar devre kartı yaklaşık olarak %20 Cu (200 kg/ton) ve %0,025 Au (250 gr/ton) içermektedir (Yazıcı & Deveci, 2011). Bu veriler göz önüne alındığında, devre kartlarının, altın cevherlerine (~3-9 gr/ton Au) göre 25-250 kat daha fazla altın ve bakır cevherlerine (~%0,5-1 Cu) göre ise 20-40 kat daha fazla bakır içerdiği anlaşılmaktadır. Genel olarak AEEE'lerin ekonomik değerinin önemli bölümünü değerli metaller Gümüş, Altın, Paladyum (Ag, Au ve Pd) ve ikinci olarak da Bakır (Cu) oluşturmaktadır. AEEE'ler için uygulanması planlanan geri dönüşüm yönteminin seçilmesinde

AEEE'nin değerli metal içeriği önemli bir etkendir. Örneğin, ergitme tesislerinde işlenecek AEEE'nin, ekonomik olarak geri dönüşümü için değerli metal içeriğinin yüksek olması beklenmektedir.



Şekil 2.3. : Cevher ile E-atık sonucundaki altın kazanımlarının karşılaştırılması.



Şekil 2.4. : TÜBİSAD Yetkilendirilmiş Kuruluşu Tarafından Toplanan AEEE'lerin Değerli Metal Hesabı. (Tanner, 2019)

TÜBİSAD Yetkilendirilmiş Kuruluşu tarafından 2016 yılından itibaren toplanan AEEE'ler üzerinde gerçekleştirilen araştırmaya göre; toplanan evsel AEEE'ler içerisinde en yüksek katma değere bakırın daha sonra ihtiva ettiği değerli metallerin sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle AEEE işleme tesislerinde değerli metallerin geri kazanımı büyük bir öneme sahiptir.

Dünya'da Atık Elektikli ve Elektronik Eşya (AEEE); Günümüzde birçok insan birden fazla bilgi ve iletişim teknolojileri cihazlarına, dizüstü ve masaüstü bilgisayarlarına aynı şekilde cep telefonlarına da sahiptir. Nihai tüketicilerin EEE'lerin hızlı değişimine ve gelişimine kayıtsız kalmamasının karşılığı olarak çevresel etkenler de boy göstermektedir. Son yıllarda ülkemizde ve dünya genelinde en hızlı büyüyen atık gruplarından olan AEEE' lerin miktarı da buna bağlı olarak artış içerisindedir. 2016 yılı itibariyle dünya genelinde 44,7 milyon ton AEEE oluşmuştur. Bu miktar yaklaşık olarak 4.470 adet Galata Kulesi'nin veya 855 adet Titanic Gemisinin ağırlığına eşittir. (Tanner, 2019)



Şekil 2.5. : 2014 Yılında Dünya'da oluşan AEEE Miktarı.

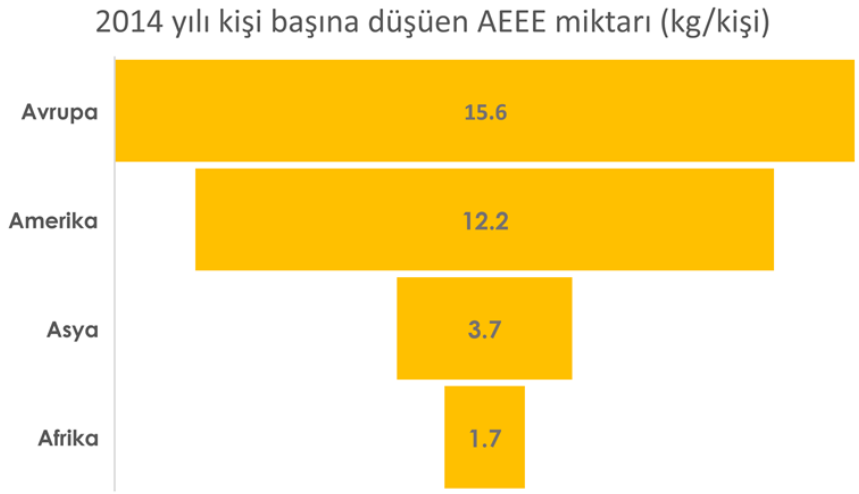
2014 yılında dünya ortalaması 5,8 kg olan kişi başına AEEE üretimi 2016 yılındaki verilere göre kişi başı 6,1 kg'a yükselmiştir. Yapılan analizler sonucunda 2021 yılında dünya genelindeki AEEE üretiminin 52,2 milyon tona yükselmesi öngörülmektedir. Tüm bu veriler

önümüzdeki yıllarda da AEEE artışının önemli ölçüde devam edeceğini göstermekle birlikte, bu verilerin kontrol edilmesi ve analizinin yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. (Balde ve diğ. 2017)



Şekil 2.6. : Dünya'da oluşan AEEE miktarı (Tanner, 2019).

Küresel düzeyde 2014 yılında kişi başına düşen AEEE miktarı Avrupa'da 15.6 kg, Amerika'da 12.2 kg, Asya'da 3.7 kg, Afrika'da 1.7 kg'dır (Balde ve diğ. 2015).



Şekil 2.7. : 2014 yılı kişi başına düşen AEEE miktarları.

Bu kapsamda özellikle gelişmiş ülkelerde AEEE'lerin geri dönüşümünün kontrollü bir hale gelmesi amacıyla çeşitli çalışmalar sürdürülmektedir. Avrupa komisyonu "Waste Electricaland Electronic Equipment (WEEE) (Atık Elektrik Elektronik Cihazları)" yönergesi ile AEEE'lerin geri dönüşümünü zorunlu hale getirirken, "Restriction of theUse of Certain Hazardous Substances (RoHS) (Bazı zararlı maddelerin kullanımının sınırlandırılması) mevzuatı ile de EEE'lerin üretimi aşamasında bazı maddelerin kullanımını sınırlandırmıştır.
Teknolojinin gelişim süreci, daha ileride yer alması ve alım gücünün çok daha yüksek olması, Avrupa ülkelerindeki AEEE sorununu, ülkemize oranla çok daha ciddi boyutlara çıkarmıştır.

2.3. AVRUPA'DAKİ MEVZUAT VE UYGULAMALAR

Dünya genelinde AEEE miktarının kontrolsüz ve hızla artmasıyla ilgili olarak önlem alınması ihtiyacı hasıl olmuş ve Avrupa Birliği Komisyonu tarafından çeşitli mevzuatlar hazırlanarak uygulamaya alınmıştır. Mevzuatlarla amaç;

- AEEE'lerin sürdürülebilir bir şekilde yönetimini gerçekleştirmek,
- Belirlenen geri dönüşüm hedeflerini gerçekleştirerek sürece ekonomik katkıda bulunmak,
- Doğal kaynakların verimliliğini arttırmaktır.

AEEE'lerle ilgili olarak AB'de, ilk "WEEE Direktifi" olan Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman Direktifi (Direktif 2002/96/EC) Şubat 2003'te yürürlüğe girmiştir. Direktif, üreticileri ürünün ömrünün sonunda, Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR) veya Kişisel Ürün Sorumluluğu olarak bilinen ekipmanlarından sorumlu kılan bir politikayı içermektedir. Ürünler, atık olarak kabul edildikten sonra atıkların toplanması, geri dönüşümü, geri kazanımı, tekrar kullanımı, yönetimi ve bertarafından üretici firma sorumlu tutulmaktadır (Widmer ve diğ. 2005). Direktif, tüketicilerin AEEE'lerini ücretsiz olarak geri gönderme ve toplama planlarının oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu plan ile AEEE'lerin geri dönüşümü ve yeniden kullanımı hedeflenmiştir. AEEE'lerin diğer atıklardan ayrı toplanması ve geri kazanımı direktif ile zorunlu kılınmıştır. Direktif, AEEE yönetimi ile ilgili olarak uygulanması gereken geri dönüşüm hedeflerini ve tüm paydaşların sorumluluklarını belirlemektedir. 2012 yılında yeniden düzenlenip yayınlanan AEEE direktifi EEE üreticisi ve dağıtıcılarına önemli sorumluluklar getirmiştir. Aralık 2012/19/EU yeni WEEE Yönergesi 4 Temmuz 2012'de kabul edilerek, 14 Şubat 2014'te yürürlüğe girmiştir. Revize edilen WEEE Direktifi kapsamında 2019 yılı itibariyle AEEE toplanma oranının % 65'e çıkarılması hedeflenmiştir.

AEEE direktifine ek olarak, EEE'lerin içeriğinde bulunan zararlı maddelerin sınırlandırılmasını konu alan "Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Kısıtlanması Direktifi" 2002 yılında (Directive 2002/95/EC RoHs) yayınlanmıştır.

2.3.1. Avrupa Ülkelerinde İyi Uygulama Örnekleri

Avrupa ülkelerinde bahsi gecen direktifler doğrultusunda çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Avrupa AEEE direktifinde ürünlerin geri alımı (takeback (eskiyi getir, yeniyi götür)) konsepti yer almaktadır (Widmer ve diğ. 2005). Bu sayede AB ülkeleri, AEEE toplama konusunda dünya ortalamasının üzerinde önemli bir ilerleme göstererek yaklaşık olarak %35 seviyelerini yakalamış bulunmaktadır. AB'de, 2013 yılında 3,5 milyon ton AEEE diğer atıklardan ayrı olarak toplanmış ve 2,4 milyon ton AEEE geri dönüştürülerek ekonomiye kazandırılmıştır. (EUROSTAT, 2017). 2016 yılı itibari ile üye devletlerin çoğu, henüz hedeflenen toplama düzeyine ulaşamamıştır. Tablo 2.2'de AB üye ülkelerdeki elektrikli ve elektronik eşyalar ve AEEE toplama oranları ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir.

Fransa’daki konsept; üreticiler sorumluluklarını dört yetkilendirilmiş kuruluşlara üye olarak getirebilmektedirler. Almanya’da durum biraz daha farklı olarak; AEEE’lerin toplanmasının yönetiminde, üreticiler yükümlülüklerini doğrudan bir lojistik ve toplama firmasıyla sözleşme imzalayarak devredebilme hakları yer almaktadır. Diğer AB ülkesi olan İtalya’da sistem; ülke çapında bulunan 15 yetkilendirilmiş kuruluş bir araya gelerek, “Centro di Coordinamento RAEE” adı altında bir koordinasyon merkezi ile tüm AEEE sistemini koordine etmektedir (Kahraman, 2014).

Fransa'da yürütülen çalışmalarda, 14.000 ton AEEE ve 92.000 ton EEE toplanmıştır. Bu ürünlerin yaklaşık % 76’sı Fransa’da yeniden kullanım için veya geri dönüşüm için AEEE olarak toplanmıştır. Toplanan elektronik ürünlerin 37,5 tonu AEEE olarak geri dönüştürülmüş, 17,6 ton evsel kullanım ve 13,5 ton enerji geri kazanımı amacıyla kullanılmıştır. AEEE sistemi içinde rapor edilen % 16'dan daha büyüktür (14.000 ton). 92.000 ton piyasaya sürüldüğü için, toparlanma oranı % 75 iken 2019’da % 65 hedefinin üzerine çıkmıştır.

Tablo 2.2. : AB Ülkeleri EEE Miktarı ve AEEE Toplama Yüzdeleri. (TÜBİSAD, 2016)

ÜLKE	Toplam EEE Miktarı (Bin Ton)	Kişi Başına Düşen EEE Miktarı (kg/kişi-yıl)	Toplanan AEEE'lerin EEE'lere Oranı (%)
İsveç	243	25	73
Finlandiya	138	25	42
Estonya	14	11	33
Litvanya	28	9	59
Danimarka	138	25	52
Polonya	486	13	35
Almanya	1609	20	45
Hollanda	306	18	38
İngiltere	1443	23	34
İrlanda	85	18	50
Fransa	1555	24	31
İspanya	574	12	37
Portekiz	122	12	41
İtalya	847	14	52
Lüksemburg	12	22	44
Avusturya	156	18	49
Macaristan	80	8	62
Romanya	131	7	18
Bulgaristan	57	8	62
Yunanistan	125	11	31

2.3.2. Türkiye'deki Mevcut Durum

Türkiye'de Atık Elektikli ve Elektronik Eşya (AEEE); Tüm dünyada olduğu gibi, Türkiye'de de diğer atık gruplarıyla karşılaştırıldığında AEEE'lerin yönetimi daha zor gerçekleştirilmektedir. Teknolojinin hızla gelişmesi, yeni model EEE'lerin piyasaya sürümündeki artış oranı ve bu artış oranına bağlı olarak oluşan AEEE miktarı gün geçtikçe artmaktadır. AEEE'lerin içerisinde bulunan değerli elementler ve maddeler nedeniyle kayıt dışı toplamalar gerçekleştirilmektedir. Bu durum kişisel veriler içeren AEEE'lerin gerekli önlemler alınmadan ikinci el piyasasında değerlendirilmesi gibi çeşitli olumsuz durumlara sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra, kullanılabilirliğini tamamen kaybeden EEE'ler uygun şekilde toplanmaması sebebiyle doğada kontrolsüz şekilde bulunmakta olup içerisindeki değerli maddeleri vahşi geri kazanım yöntemleriyle çevre ve insan sağlığına dikkat edilmeden

kazanılmaya çalışılmaktadır. Bu durum çevre ve insan sağlığı açısından büyük tehdit oluşturmaktadır.

Bu tip olumsuzlukların önüne geçmek için Türkiye'de de çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmektedir. AEEE yönetiminin doğru şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla, AB direktiflerine uyumlu mevzuatlar yürürlüğe girmiştir. AEEE toplama sistemlerinin kurulması amacıyla kriterler belirlenmiş, bu kapsamda paydaşlar yönetmeliklerde tanımlanmış ve çalışmalar gerçekleştirilmeye başlanmıştır (Sayman ve diğ. 2011).

Türkiye'de yürütülen çalışmalar, dünya genelinde hızlı artış gösteren bu atık grubuna karşı doğru ve etkin toplama, geri dönüşüm sistemi kurmak amacıyla hızla devam etmektedir. Özellikle bu konuda yasal mevzuatlardaki değişiklik çalışmaları ve 2017 yılında Cumhurbaşkanlığı Külliyesinde ve ÇŞB'de başlatılan "Sıfır Atık Uygulamaları" çalışmaları ile oluşan AEEE'lerin ve diğer atık kategorilerinin doğru yöntemle geri dönüşüme kazandırılması için çalışmalara hız verilmiştir.

Türkiye, AEEE yönetimi konusunda AB uyum süreci kapsamında 22 Mayıs 2012 tarihinde AEEE'lerin Kontrolü Yönetmeliğini hazırlamış ve uygulamaya geçirmiştir. Yayımlanan yönetmelik ile;

- EEE' ların üretiminden bertarafına kadar çevre ve insan sağlığının korunması amacıyla EEE'larda bazı zararlı maddelerin kullanımını sınırlandırmak,
- Sınırlandırmalardan muaf tutulacak uygulamaları belirlemek,
- EEE'ların ithalatını kontrol altında tutmak,
- AEEE'lerin oluşumunu en aza indirmek ve bertaraf edilecek atık miktarının azaltılması için yeniden kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım yöntem ve hedeflerine ilişkin hukuki ve teknik esasları düzenlemek,
- AEEE Toplama sistemlerini oluşturmak,
- Kamuoyunun bilinçlendirilmesini sağlamak,

amaçlanmıştır.

EEE ve AEEE olarak nitelendirilecek ürünler yönetmelikte tanımlanmış, kategoriler belirlenmiştir. Yönetmelikteki tüm hükümler, bütün ürün ve üreticileri kapsamaktadır. AEEE yönetiminden sorumlu paydaşlar olan Türkiye Ccumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre ve Şehircilik İl Müdürlükleri, Büyük Şehir Belediyeleri, İlçe Belediyeleri Yetkilendirilmiş Kuruluşlar, EEE Üreticisi Firmalar ve Lisanslı Tesislerin görev ve yükümlülüklerine yer verilmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012).

2.3.3. Türkiye'de AEEE Kapsamında İlgili Paydaşlar

AEEE'lerin Kontrolü Yönetmeliği kapsamında, AEEE yönetiminde rolü olan her paydaş için görev ve sorumluluklar tanımlanmıştır. Paydaşların kendi sorumluluklarını yerine getirmelerinin yanı sıra diğer paydaşlarla kuracağı işbirlikleri de AEEE yönetiminde önemli yere sahiptir.

Yönetmeliğin uygulama sorumluluğu T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nda olup, AEEE yönetiminde en yetkili kurumdur. Denetim ve izleme yapmak Bakanlığın yetkileri arasında tanımlanmaktadır.

Çevre ve Şehircilik İl Müdürlükleri; getirme merkezleri, geri dönüşüm ve geri kazanım tesisleri tarafından hazırlanan belgeleri inceleyen ve denetleyen kurumdur (Sayman ve Akbulat, 2016). Belediye AEEE yönetim planını hazırlamak, yönetim planı çerçevesinde AEEE toplamalarını gerçekleştirmek, konutları AEEE toplaması konusunda bilgilendirmek Belediyelerin görevleri kapsamındadır.

AEEE yönetiminde, Büyükşehir Belediyelerine düşen ana görev ise ilçe belediyeleri arasında koordinasyonu sağlamaktır.

AEEE yönetiminde bir diğer paydaş olan EEE üreticileri ise yönetmelik göz önünde bulundurulduğunda, AEEE'lerin toplanması, ayrıştırılması, geri kazanımı ve çevresel açıdan uygun olarak bertarafından sorumludurlar.

Yetkilendirilmiş kuruluşlar, üretici firmaların yükümlülüklerini yerine getirmek üzere üreticilerin bir araya gelerek oluşturduğu, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yetkilendirilen ve kâr amacı gütmeyen kuruluşlardır.

Yetkilendirilmiş Kuruluşlar, ilgili mevzuatlarda belirtilen AEEE toplama, geri kazanım/geri dönüşüm hedeflerinin sağlanması amacıyla atık yönetim planı oluşturup T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığına sunmakla yükümlüdür. Ayrıca temsil etmiş olduğu üreticiler adına büyükşehir belediyeleri, ilçe belediyeleri ve geçici faaliyet belgesi/çevre izinine sahip lisanslı AEEE işleme tesisleri ile işbirliği yapmak ve bu çerçevede yürütülen faaliyetleri izlemekle, sözleşme yaptığı belediyelerde getirme merkezlerinde, toplama noktalarında toplanan AEEE'leri geri kazanımını sağlamak üzere tamamını geri almakla veya aldırmakla yükümlüdür.

Yetkilendirilmiş Kuruluşlar ayrıca AEEE yönetimiyle ilgili gerçekleştirmiş oldukları tüm çalışmaları T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı' na raporlama, getirme merkezlerine ilgili ürün gruplarına uygun toplama konteynerleri tedarik etmekle ve temsil ettikleri üreticiler adına AEEE yönetimi ile ilgili eğitim ve bilinçlendirme çalışmaları düzenlemek ve bu çalışmalarda kullanılacak materyalleri temin etmekle yükümlüdürler. Eğitim ve bilgilendirme çalışmalarını münferit olarak yerine getirebilecekleri gibi, belediyelerle veya farklı paydaşlarla iş birliği içerisinde de gerçekleştirebilirler.

Tüketiciler ise AEEE'ları yetkilendirilmiş kuruluşların, üreticilerin ve belediyelerin belirledikleri kriterlere göre diğer atıklardan ayrı olarak biriktirerek AEEE'larını dağıtıcıların, yetkilendirilmiş kuruluşların, belediyelerin, üreticilerin veya işleme tesislerinin oluşturdukları toplama noktalarına götürmekle, kayıt dışı toplama yapanlara atıklarını vermemekle yükümlüdür.

Görüldüğü üzere AEEE geri dönüşüm sisteminde her bir paydaşın rolü oldukça önemlidir. Bir paydaşın görevinde aksaklık yaşanması diğer tüm paydaşları da doğrudan etkilemektedir.

2.4. ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYALARIN YÖNETİMİ

Atık hiyerarşisi, atık yönetimi seçeneklerinin çevre ve canlılar açısından en fazla tercih edilmesi gerekenden, en az tercih edilmesi gerekene doğru sıralanmasıdır. Günümüzde uygulanan mevcut atık yönetimi hiyerarşisi ve olması gereken atık yönetimi hiyerarşisi Şekil 2.8'de verilmiştir. İstenilen atık yönetim hiyerarşisi mevcut durumdaki hiyerarşinin tam tersidir.



Şekil 2.8. : Atık yönetimi hiyerarşisi.

EEE'ler içinde Atık Hiyerarşisinin uygulanması oldukça önemlidir.

2.4.1. Önleme

Atık Yönetimi Yönetmeliği'ne göre; Eşyaların yeniden kullanılması ve/veya kullanım ömürlerinin uzatılması sayesinde atık miktarının en aza indirilmesi, ürünlerin üretiminde zararlı ve/veya tehlikeli maddelerin azaltılması ve oluşan atığın çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin en düşük seviyeye indirilmesine ilişkin herhangi bir madde ya da malzeme atık haline gelmeden önce alınacak olan tedbirler olarak tanımlanmaktadır.

Atık hiyerarşisinin en önemli adımlarından biri önlemedir. Bu safhada daha eşyalar üretim aşamasındayken atık oluşumunu en aza indirecek tasarım çalışmaları yapılmalıdır.

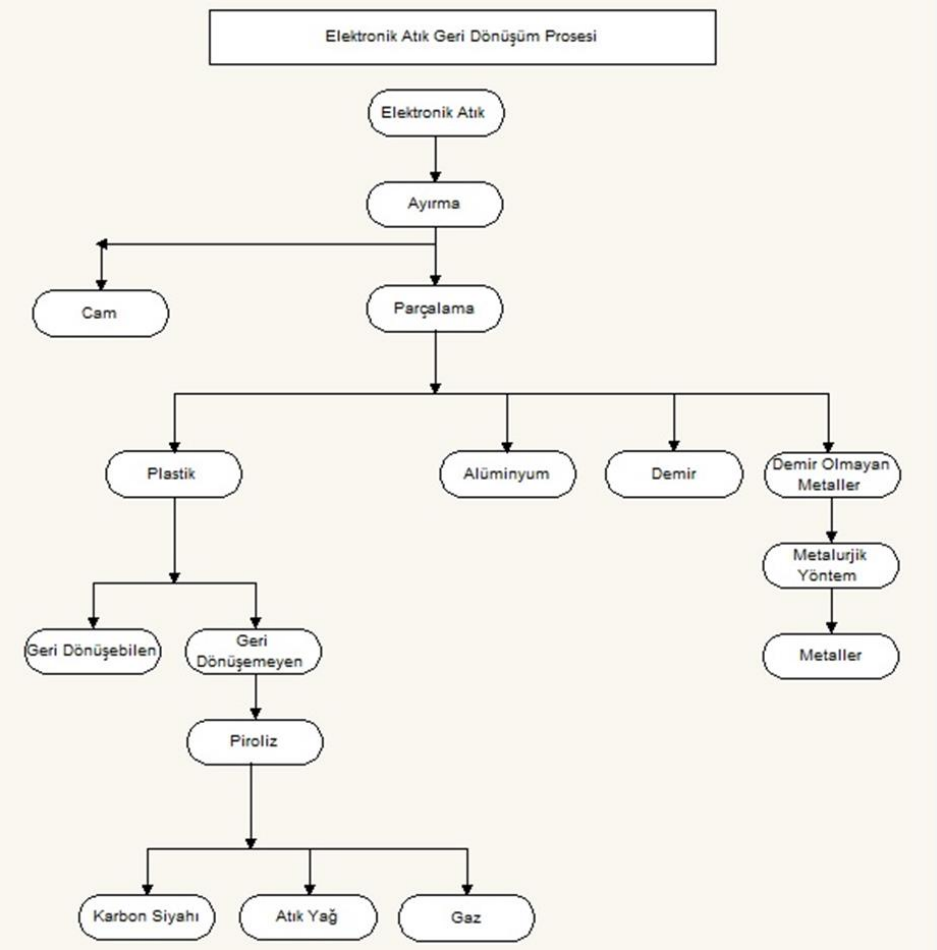
2.4.2. Kaynakta Azaltma

Atık oluşumunun önlenmesinin mümkün olmadığı durumlarda kaynakta azaltma işlemleri uygulanmalıdır. Eşyaların büyük hacimlerde satın alınmasıyla ambalaj miktarlarının azaltılması, elektronik ortamda iletişime ağırlık verilmesi ile basılı kağıt tüketiminin düşürülmesi, ürünlerin kullanım ömürlerinin uzatılması gibi uygulamalar örnek olarak gösterilebilir.

2.4.3. Yeniden Kullanım

Atık Yönetimi Yönetmeliği'ne göre; eşyaların direk kendisinin ve/veya atık olmayan parçalarının tasarlandığı şekliyle aynı amaç için kullanıldığı işlemler olarak tanımlanmaktadır.

Atıkların üretim şekli korunarak, herhangi bir işleme tabi tutulmadan ekonomik ömrü doluncaya kadar kullanılmasına yeniden kullanım denilmektedir. Örneğin arızalanan elektronik eşyaların içinde bulunan, arızalı kısım haricinde çalışır durumda olan ekipmanların aynı şekilde farklı bir elektronik eşya ile kullanılmasıdır.



Şekil 2.9. : AEEE Geri Dönüşüm Prosesi.

2.4.4. Geri Dönüşüm

Atık Yönetimi Yönetmeliği'ne göre, organik maddelerin tekrar işlenmesi de dâhil olmak üzere atıkların işlenerek asıl kullanım amacı ve/veya farklı amaçlar içinde çeşitli ürünlere, malzemelere ve/veya maddelere dönüştürüldüğü herhangi bir geri kazanım işlemine geri dönüşüm denilmektedir.

2.5. ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYALARIN (AEEE) GERİ KAZANIMI

Doğal kaynakların sınırsız olmadığı dünyamız da atıkların tekrar üretim sürecine kazandırılabilmesi oldukça önemlidir. Bu kapsamda yeniden değerlendirilebilme özellikleri ve imkanı olan atıkların ve/veya ihtiva ettiği parçalarının, bileşenlerinin çeşitli fiziksel ve/veya kimyasal işlemlerden geçirilmesiyle hammadde olarak tekrar üretim sistemine dahil edilmesine geri kazanım denilmektedir.

Geri kazanım ve geridönüşüm birbirine benzeyen ancak sürekli olarak karıştırılan bir durumdur. Her ne kadar iki sistemde de amaç atıkların çöpe, düzenli depolama sahalarına gitmesine engel olmaksa da birbirinden farklı oldukları durumlar vardır. Cam'ın yeniden değerlendirilmesi geri dönüşüm olarak tanımlanabilir, ancak cep telefonu içerisinde yer alan bir board dan altın elde edilmesi geri kazanım olarak tanımlanabilir.

Geri kazanım işlemleri gerçekleştirilirken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Aksi taktirde geri kazanımdan elde edilecek faydadan çok zarar oluşabilir. Geri kazanımın en verimli şekilde nasıl yapılacağı, kullanılacak teknoloji seçimi büyük önem arz etmektedir. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de bir çok atık farklı yöntemlerle sistemli veya sistemsiz olarak geri kazanım işlemlerine tabi tutulmaktadır.

Özellikle AEEE'lerin geri kazanımının önemli olmasının en büyük sebebi içerdiği değerli metallerdir. Bu metallerin içerisinde geri kazanım işlemi en çok yapılan metal altındır. Bakır(Cu), alüminyum(Al) ve demir(Fe) gibi bazı metallerin gerikazanımı, EEE'lerin üretim sürecinde yüksek miktarda kullanıldıklarından önem arz etmektedir.

2.5.1. Geri Kazanım Teknikleri

AEEE'lerin geri kazanımı için birden fazla yöntem bulunmaktadır. Bunlar;

- Hidrometalurjik geri kazanım yöntemleri
- Pirometalurjik geri kazanım yöntemleri
- Elektrokimyasal geri kazanım yöntemleri
- Biyokimyasal geri kazanım yöntemleri

Bu geri kazanım yöntemlerinin hangisinin kullanılacağı AEEE'lerin türü, fiziksel ve kimsayal özellikleri ve geri kazanılması istenilen metallerinin türüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Hidrometalurjik Geri Kazanım Yöntemi

Hidrometalurjik geri kazanım yönetimi; kontrol edilebilirliği, kesin sonuç elde edilebilirliği ve öngörülebilir işlem olması sebebiyle son yıllarda pirometalurjik geri kazanım yöntemine göre daha çok kullanılan bir yöntemdir. Hidrometalurjik yöntem, katı maddelerin çeşitli asit ya da aşındırıcı liç süreçlerinden geçirilme işlemidir. İlk olarak mekanik işlemlerle AEEE'lerin hacimleri küçültülür. Ardından AEEE'lerin içindeki değerli metaller asit ve aşındırıcı kimyasallarla işlem görerek çözelti içerisine geçer. Son aşamada ise elektroliz ilkesine dayanan elektrolit arıtım, kimyasal indirgeme ya da kristalleştirme yöntemleri kullanılarak değerli metallerin geri kazanımı sağlanır.

Pirometalurjik yöntemle karşılaştırma yapıldığında hidrometalurjik yöntem; ilk yatırım maliyetleri ile çevre etkisi düşük, metal kazanma oranı yüksek ve küçük ölçekli firmalar için ise daha uygun yöntem olarak dikkat çekmektedir. Ayrıca hidrometalurjik sistemlerde, fiziksel yöntemler kullanıldığında oluşan metal kayıpları da (%10 ile- %35 arasında olup) düşük seviyelerde olmaktadır. Bu sebeplerden ötürü, AEEE'lerden metallerin geri kazanımında hidrometalurjik yöntemler önemli bir potansiyele sahiptir. (Yazıcı ve Deveci, 2009).

Pirometalurjik Geri Kazanım Yöntemi

Pirometalurjik gerikazanım metodları ısıl işlem olarak adlandırılır. Bu yöntem yüksek sıcaklık reaksiyonları, ısıtma, ergitme ve dönüştürme (metal oksitten metale) işlemlerini içerir (Talınlı ve Tunçer, 2014). Pirometalurjik gerikazanım metodu AEEE'lerde bulunan demir haricindeki değerli metallerin geri kazanımda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Pirometalurjik gerikazanım metodu AEEE'lerden değerli metallerin geri kazanımı için tek başına yeterli olmadığı gibi yüksek sıcaklıklarda çalışıldığı içinde maliyet ve emisyon kimi konularda sorun oluşturabilmektedir (Özkan, 2018) .

Pirometalurjik metotlar hidrometalurjik metotlarla mukayese edildiğinde kontrolü daha zor ve esnekliği daha az metotlardır (Antrekowitsch ve diğ. 2006). Atık olan baskılı devre kartlarına ergitme öncesi piroliz işlemi uygulamanın, ekonomik değeri düşük olan (metal oranı düşük ancak plastik oranı yüksek) devre kartlarının metal oranını yükselteceği ve ergitme sürecinde oluşabilecek zararlı gaz miktarını azaltacaktır. AEEE'ler yaygın olarak pirometalurjik tesislerde değerlendirilmektedir. AEEE işleyen Ergitme tesisleri metal ve/veya değerli metal oranı yüksek (özellikle bakır, altın, alüminyum, paladyum ve nadiren Platin içeren) AEEE'leri tercih etmektedir. AEEE'lerin ergitme işlemleri esnasında bazı teknik ve çevresel sorunlarla karşılaşılması muhtemeldir. Örneğin; atık olmuş baskılı devre kartları ergitme tesislerinde işleme tabi tutulduğunda, kartların içerisindeki organik maddelerin (klorlu ve/veya bromlu alev geciktiriciler gibi) yanması ile çevre açıdan zararlı dioksinler ve furanlar oluşmaktadır. AEEE'ler içerisindeki plastikler ergitme işlemi esnasında indirgeyici ve/veya yakıt olarak işlev görmektedir. Fakat atık olan devre kartlarındaki plastik malzemeler, ihtiva ettikleri halojenler ve sahip oldukları düşük yanma ısıları nedeniyle yüksek kaliteli yakıt olarak değerlendirilmemektedir. Yanmayı sağlıklı bir şekilde gerçekleştirmek için mutlaka yanma ısısı yüksek yakıta (kok gibi) gerek duyulmaktadır. AEEE'lerin içerisindeki bazı metaller ergitme işlemi esnasında buharlaşarak süreçten uzaklaşabilmektedir. AEEE'lerde bulunan silisyum ise ergitme işlemleri sonunda oluşacak olan cüruf miktarını artırmakta olup metal ve/veya değerli metal kaybını yükseltmektedir. Metal ve/veya değerli metal kayıpları, maliyeti yüksek olaran ergitme işlemini olumsuz yönde etkilemektedir. (Yazıcı ve Deveci, 2009).

Elektrokimyasal Geri Kazanım Yöntemi

Elektrokimyasal metotlar, kimyasal süreçler ve elektrik akımı üzerine kurulu teknolojik uygulamalardır. Bu proeseslerin birçok uygulama sahası olması nedeniyle AEEE'lerden metallerin ve/veya değerli metallerin geri kazanılmasında da kullanılması mümkündür. Elektrokimyasal metotlar, yaygın kullanımı, ekonomik boyutu ve çevre dostu olması nedeniyle ülkemiz açısından oldukça önem arz etmektedir (MAM, 2018).

AEEE'lerden değerli metallerin geri kazanımı sırasında, çeşitli rafinasyon yöntemlerinden ağırlıklı kullanılanı elektrokimyasal geri kazanım yöntemidir. İyon değişimi, selektif çözümlendirme ve solvent ekstraksiyon gibi hidro metalurjik metotlarla zenginleştirilen AEEE'ler içerisindeki metaller elektrokimyasal metotla sulu çözeltiden katotta direkt olarak redüklenir. Bu uygulamaya örnek olarak bakır ve nikel içeren sülfat çözeltisinden bakırın elektrolizle ayrılması gösterilebilir.

Biyokimyasal Geri Kazanım Yöntemi

Bu proseste mikroorganizmalar AEEE'ler içerisindeki metallerle etkileşime girerek metallere bağlanırlar. Biyo metalurjik proseste biyoliç ve biyolojik soğurulma (biyo sorpsiyon / biyo kütle aracılığıyla metal iyonlarının birleştirilmesi ve/veya pasif emilimi) olacak şekilde iki metot kullanılabilir.

Biyoliç yönteminde endüstriyel uygulamalar ile özellikle metalleri altın ve bakırdan ayrıştırmak için kullanılırken biyo sorpsiyonda ise ağır ve değerli metalleri toplamak için canlı mikroorganizmalar (alg, bakteri, maya ve küf vb.) kullanılır. Metaller bu mikro organizmaların hücre duvarlarına fiziksel ve kimyasal olarak tutunur. Mikroorganizmalar bu işlemle absorbent (yüzeye tutucu) olarak görev yapar. Biyo sorpsiyon için kullanılacak mikroorganizmaların geniş yüzey alanı, yüksek çekim gücü ve farklı metalleri bağlayabilme gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir.

Absorpsiyon kapasitesi mikroorganizmanın türüne göre değişir ve yüksek absorpsiyon verimi amacıyla kitosan gibi metal absorpsiyonunu artıran ajanlar da kullanılabilir. Bu metotdan etkin mikroorganizmayı bulmaya yönelik araştırmalar günümüzde halen sürmektedir. Biyo metalurjik gerikazanım yönteminin diğer yaygın olan yöntemlere göre kullanılmasının amacı düşük maliyetli ve az miktarda kimyasala ihtiyaç duyulmasıdır.

Tablo 2.3. : E-atıkların Geri Dönüşümünde Kullanılan İşlemler. (Yazıcı ve Deveci, 2009)

AEEE'lerin Geri Dönüşümünde Kullanılan İşlemler	Fiziksel	Pirometalurjik	Hidrometalurjik	Biyometalurjik
Avantajları	Tüm AEEE'lerde kullanılabilecek basit işlemler	Pek çok AEEE türü için uygun	Metal kazanma verimi yüksek esnek küçük ölçekte uygulanabilir, zararlı gaz çıkışı yok	Çevresel etksi düşük, küçük ölçekli firmaların uygulayabileceği nitelikte
Dezavantajları	Değerli metal kaybı yüksek	Pahalı ve fazla enerji gerektiren sistem	Ön hazırlık işlemi gerektiriyor, atık çözeltinin arıtılması gerekiyor	Uzun zaman gerektiren işlem

2.5.2. Bertaraf Yöntemleri

Atıkların çeşitli önlemlere rağmen oluşması ve hiç bir şekilde yeniden kullanımı, gerikazanımı ve/veya geridönüşümü artık olmayan durumlarda uygulanan bir yöntemdir. Kelime anlamına göre ortadan kaldırmak, yok etmek anlamına gelmektedir.

Atık yönetiminde bertaraf atıkların türüne göre çeşitli yöntemlerle yapılabilmektedir. Atıklar T.C.Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 29314 sayı ve 02.04.2015 tarihli resmi gazetede yayımlanan atık Yönetimi Yönetmeliği EK-2A' da belirtilen yöntemlerle bertaraf edilmelidir. Örneğin; yer altında veya yer üstünde düzenli depolama, derine enjeksiyon (boruyla taşınabilir ve/veya pompalanabilir atıkların eski maden ocaklarına, derin kuyulara taşınması ve/veya pompalanması gibi), enerji geri kazanımı da dahil olmak üzere denizde (bu uygulama ülkemizin taraf olduğu uluslar arası sözleşmeler gereği ülkemizde yasaktır) veya karada yakma, özel mühendislik gerektiren depolamalar örnek gösterilebilir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 MALZEME

3.1.1. Elektronik Atıklar

Deneysel çalışmalarda, öncelikle ev veya ofislerde kullanılan kullanım ömrünü tamamlamış elektronik atıklar (cep telefonu, dizüstü ve masaüstü bilgisayar, televizyon ve yazıcı) kullanılmıştır. İkinci aşamada yapılan deneysel çalışmalarda ise, çeşitli elektronik atıklarda bulunan boardlar, cpular ve konektörler kullanılmıştır. Elektronik atık örnekleri, kullanım ömrünü tamamlamış kişisel elektronik araçlardan ve Devre karları, CPU'lar ve Konnektörler ise ASA Metal –Eyüp tesisinden alınmıştır.

ASA Metal AEEE geri dönüşüm tesisi Eyüp / İstanbul'da kurulmuştur. PCB, CPU ve konektörler gibi e-atıklar kabul edilmektedir ve hidrometalurjik geri kazanım yöntemleri uygulanmıştır. Tesisten alınan PCB'ler ve CPU'ların konektörleri sınıflandırılmış ve analiz edilmiştir.

3.1.2. Kimyasallar

Deneysel çalışmalarda, kral suyu hazırlanması amacıyla Sülfürik asit (H_2SO_4) ve Hidroklorik asit (HCl) karışımı kullanılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalarda demir (III) klorür ($FeCl_3.6H_2O$, %98-102), Demir (II) klorür ($FeCl_2.4H_2O$, 99%), ve Amonyum hidroksit (NH_4OH, %26) kullanılmıştır. Sodyum hidroksit (NaOH,% 99) ve HCI, pH'ı ayarlama için kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm kimyasallar Merck tarafından sağlanmış ve tüm deneylerde deiyonize su kullanılmıştır.

3.2. YÖNTEM

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, çeşitli elektronik atıklar ile elektronik atıklarda kullanılan boardlar, CPUlar ve konektörlerin geri kazanımına yönelik olarak hidrometalurjik geri kazanım tekniğinin düzenlemesi ve optimizasyonu amaçlanmıştır. Bu amaca uygun olarak belirtilen elektronik atıklar üzerinde ayrı ayrı deneysel çalışmalar yapılmıştır.

3.2.1. Mekanik Sökme - Ayırma

Elektronik atıklar ilk olarak fiziksel ayırma işlemine tabii tutulmuştur. Burada çekiç, tornavida sac kesme makası gibi mekanik ekipmanlar ile sökme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her elektronik atık bireysel olarak değerlendirilmiştir. Sökme işlemi gerçekleşen atıkların; plastik ve metal kısımları ayrılmıştır.

3.2.2. Fiziksel Olarak Ayrılabilen Metal Kısımların Ayrılması

Sökme işlemi ile açılan parçaların içinde bulunan alüminyum ve bakır kısımlar fiziksel olarak ayrılmıştır. Boardların üzerinde bulunan kondansatörlerin dış kısmındaki alüminyumlar ve boardın üzerinde sarılı halde bulunan bakır kısımlar ayrılmıştır. İlk olarak, elektronik atık demontaj, kırma ve öğütme işlemlerinin fiziksel yöntemlerine tabi tutulurlar. Atık, değirmende <0.5 mm büyüklüğünde bir parçacık büyüklüğüne öğütüldü. Daha sonra, alüminyum ve plastikler siklon ayırıcıdaki hava yoluyla ayrılır. Manyetik ayırıcılarda, manyetik kısımdaki atıklar demir dışı metallerden ayrılır.

3.2.3. Hidrometalurjik Yöntem

Elektronik atıklar ile board, cpu ve konektörler üzerinde bulunan altını geri kazanabilmek amacıyla bu ekipmanlar üzerinde kral suyu ile işlem yapılmıştır. Kral Suyu hazırlamak amacıyla 1 birim HNO_3 ile 3 birim HCl karıştırılmış ve çözelti sıcaklığı artmıştır. Beher içerisine alınan elektronik atıklar, kral suyu ile işleme tabi tutulurken altında bulunan ısıtıcı 40 ^oC ye ayarlanarak ısıtma işlemi uygulanmıştır.

Bu çözeltiye belirli periyotlar ile karıştırma işlemi yapılıp 2 saat süre ile ısıtılmaya bırakılmıştır. 2 saatlik sürenin sonunda çözelti dekante edilerek devrelerden ayrılmıştır. Asit çözeltisini nötrlemek amacı ile üre ilavesi yapılmıştır. Nötrleme işleminin tamamlanmasının ardından çöktürme işlemine başlanmıştır.

Çözeltide bulunan altının, altın sülfat olarak çökmesi amacı ile çözeltiye $FeSO_4$ ilavesi yapılmıştır. 1 gün süre ile çökmesi beklenmiştir. 1 günün sonunda beherin dip kısmında oluşan çökelti çözeltiden ayrılmıştır. Ayrılan bu kısım porselen krozenin içerisine alındıktan sonra önce 105^oC de etüvde kurutulmuştur. Daha sonra kroze kül fırınına alınarak diğer maddelerin

uçurulması sağlanmıştır. Elde edilen kısımdaki altın miktarının tespit edilmesi amacıyla numuneler analize gönderilip, sonuçlar kaydedilmiştir.

Çözeltinin geriye kalan kısmı ise; elektroliz yapılmak üzere ayrılmıştır. Elektroliz sonucu elde edilen bakırın tartım işlemleri yapılarak sonuçlar kaydedilmiştir.

Altın geri kazanım tesisinde ise hidro metalurjik metot kullanılmıştır. Bu metotta kullanılan Kral suyu her biri farklı özellikte iki bileşenli asit içerdiğinden dolayı altını çözmektedir. Nitrikasit iyi bir oksitleyicidir. Altın iyonları ile kompleks yapı oluşturmuş hidro klorik asitten gelen klorür iyonları çözeltiden uzaklaştırılır. Au^{3+} iyonlarının oranını azaltmak çözeltiyi oksitlenmiş bir forma dönüştürmektedir. İlgili reaksiyonlar aşağıda gösterilmiştir.

$$HNO_3 + 3HCl \rightarrow NOCL + 2H_2O + 2Cl \quad (1)$$

$$Au(s) + 3NO_3 + 6H+ \rightarrow Au^{3+} + 3NO_2 + 3H_2O \quad (2)$$

$$Au^{3+} + 4Cl^{-} \rightarrow AuCl^{-4} \quad (3)$$

$FeSO_4$ kral suyu işleminde nötralizasyonu sağlamak için kullanılmıştır. Kral suyu oluşturulurken 1/3 oranında nitrik asit ve 2/3 oranında hidroklorik asitin karıştırılmasıyla oluşturulan altın, platin gibi değerli metalleri çözebilen bir asit çözeltisidir.

Tablo 3.1. : Kral suyu deneylerinde kullanılan kimyasal miktarları.

AEEE türleri	**HNO_3 miktarı**	**HCl miktarı (ml)**	**Sıcaklık (^{0}C)**
Cep Telefonu(1)	20	60	40,1
Cep Telefonu(2)	20	60	40,0
Cep Telefonu(3)	20	60	39,9
Dizüstü Bilgisayar	200	600	42,0
Masaüstü	200	600	40,5
Yazıcı	200	600	40,2
C.R.T. Televizyon	150	450	41,0
Board	300	900	41,5
CPU	100	300	40,4
Konektör	100	300	41,5

Bilgisayar içerisinde bulunan devre kartları, CPU'lar ve konektörler ilk olarak 70 °C 'de 1 saat boyunca nitrik asit ve su ile işleme tabi tutulmuştur. Bu işlem devre kartlarından, CPU'lardan ve konektörlerden altını ayırarak metalleri çözmektedir. İşlem gerçekleştirilirken öncelikli olarak devre kartları, CPU ve konektörler kral suyu ile işleme tabi tutulduktan sonra çözelti ayrı bir behere alınır. Çözeltiden ayrılan katı parçalar tekrar mekanik kırma işlemleri uygulanarak daha küçük parçalar haline getirilir. Bu işlem sonucunda elde edilen parçalar bir kez daha kral suyu ile muamele edilir. Buradan gelen çözelti ile ilk işlemden gelen çözelti birleştirilerek $FeSO_4$ ile karıştırılır. Karıştırılan çözelti değerli metallerin çökmesi amacıyla dinlenmeye alınır. Çökme işlemi tamamlandıktan sonra dipte değerli metallerin bulunduğu çökelti ve üzerinde de bakır içeren asit çözeltisi bulunmaktadır.

Çökelti ile çözelti birbirinden ayrıldıktan sonra çözelti içerisindeki bakırı ayrıştırmak için elektroliz metodu kullanılır.



Şekil 3.1. : Kral suyu ve hazırlanması.



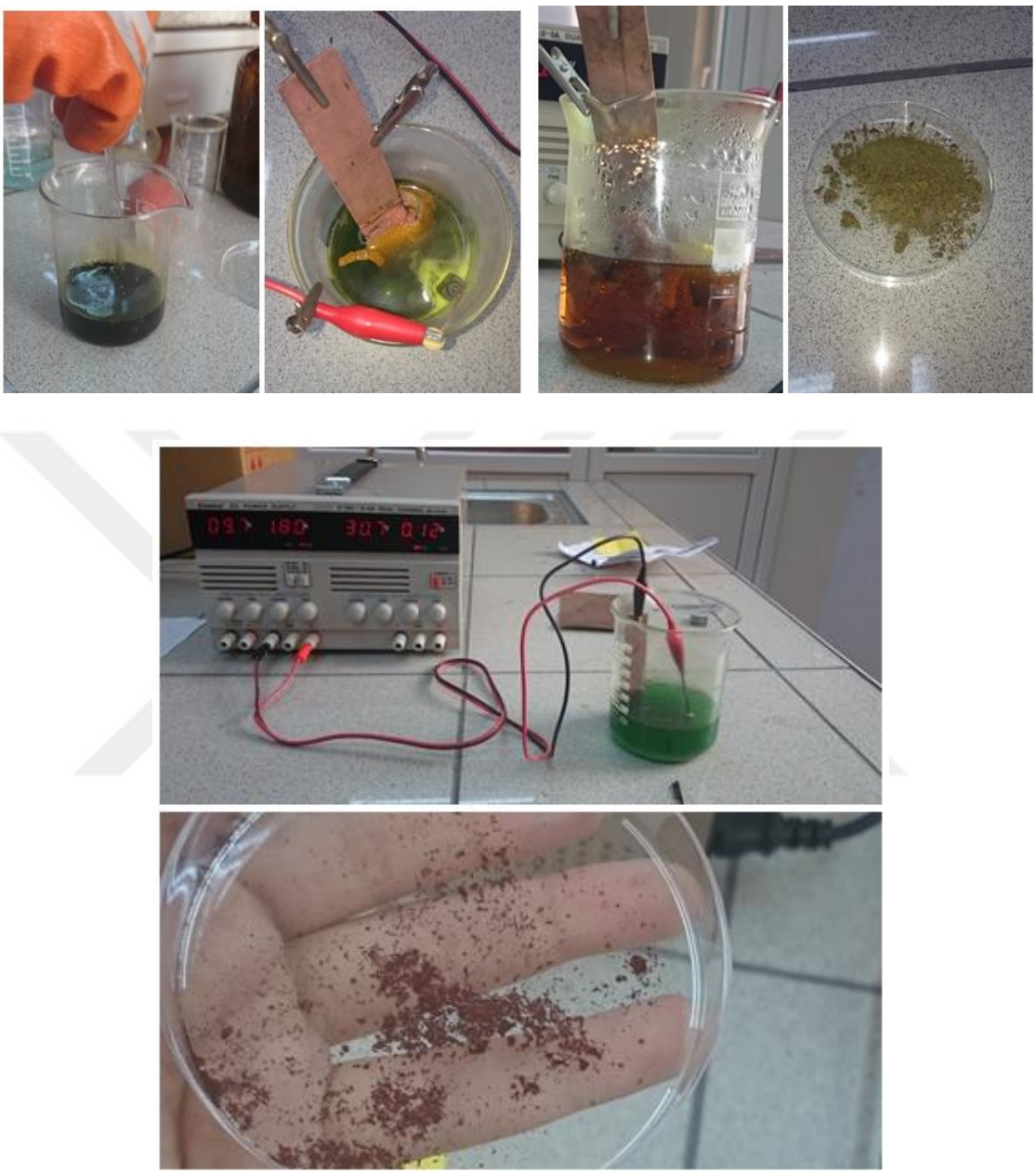
Şekil 3.2. : Hidrometalurjik İşlemler.



Şekil 3.3. : Bilgisayar Kasası ile yürütülen Hidrometalurjik İşlemler.



Şekil 3.4. : Elektroliz İşlemleri.



Şekil 3.5. : Bakır geri kazanımı denemeleri.

3.3. ANALİZLER

Altın, platin ve paladyum için standart yöntemlerle analiz seçenekleri bulunmaktadır. 30 g'lık basit bir şarjdan tam metal ekranlı yangın testine kadar, kaba altın içerenler de dahil olmak üzere tüm örnek tipleri için güvenilir veriler elde edilebilmektedir. Altın içeren malzemelerin siyanür ile liç hazırlanması gerekmektedir ve eşit olmayan şekilde dağılmış altın bulunan sistemleri değerlendirmek ve çıkarılabilirliği test etmek için ek bir uygulama sağlamaktadır.

Bu uygulama için ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer) cihazı kullanılmaktadır. Bu cihaz katı ve sıvı örneklerde içerisinde çok sayıda elementin hızlı, ucuz, hassas ve doğru şekilde nitelik ya da nicelik olarak ölçümünü sağlayan yeni ve ileri teknoloji ürünüdür. Örnek içerisindeki çok sayıda elementi aynı anda hızlı analiz edebilme özelliği sayesinde başta metalik elementler olmak üzere periyodik tablodaki elementlerin büyük çoğunluğunun nicel ve yarı-nitel tespitlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. ICP-MS'in çalışma aralığı diğer metotlara göre oldukça geniştir. Çok sayıda elementin pg-mg/L arasında kalibrasyon grafiklerini çizilebilmekte olup bu farklı derişime sahip birçok elementin aynı anda analizini gerçekleştirebilmektedir.

3.4. EKONOMİK ANALİZ

Bu çalışmada fiziksel metotlar sırasında kullanılan enerji, iş gücü ve bazı giderler belirlenmiştir.

Gerçek bir ekonomik analiz için geri kazanım proseslerindeki giderler iki aşamada ele alınmıştır. İlk aşamada AEEE toplama, tasnif etme, test etme, sökme ve ayırma işlemleri için maliyetler dikkate alınırken, ikinci aşamada da iş gücü, enerji, kimyasallar, su, atıksu, ekipman ve işletme giderleri incelenmiştir. İşletme gelirleri, malzemelerin geri kazanımından ve altın satışından elde edilmiştir.. Aşağıdaki denklemler işletme giderleri ve gelirleri için oluşturulmuştur;

İşletme Maliyetleri = AEEE + Enerji + Taşıma + Ekipman + Kira +İş Gücü

Toplam Maliyet = $\sum$ (her prosesin maliyeti)

İşletme Gelirleri = Geri Kazanılan Ürünleri Satışı + Altın Satışı

4. BULGULAR

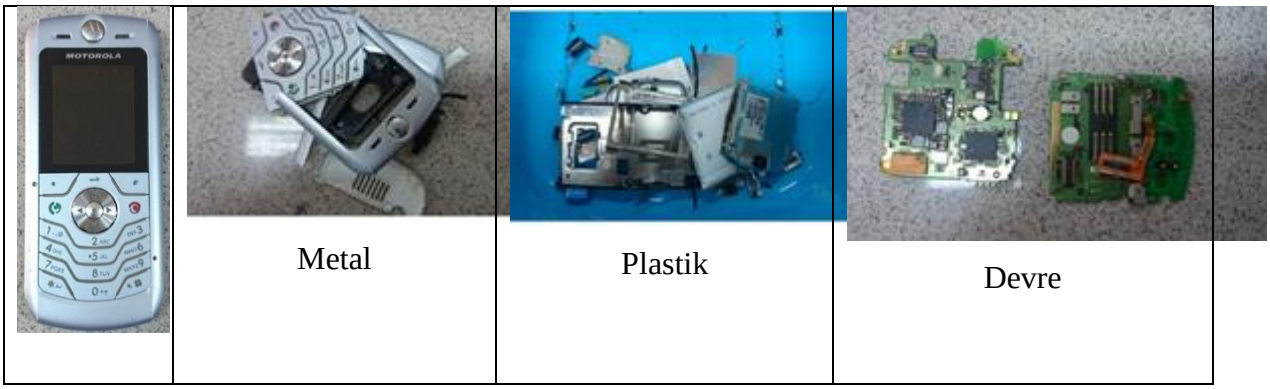
4.1. ELEKTRONİK ATIKLARIN BİLEŞİMİNİN BELİRLENMESİ

Çalışmamızda, öncelikle kişisel kullanım sonrasında kullanım ömrünü tamamlamış çeşitli elektronik atıkların demonte edilmesi ile metal, plastik ve elektronik kısımları ayrılmış ve ağırlıkça dağılımı belirlenmiştir. Bu amaçla, farklı üreticiler tarafından üretilen cep telefonları, dizüstü bilgisayar, masaüstü bilgisayar, yazıcı ve tüplü televizyon demonte edilerek, parçalanmış ve tartılmıştır. Ayrıca elde edilen verilerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi ortaya konulmuştur.

Çalışmamızın ikinci bölümünde, elektronik atıkların geri kazanımı amacıyla uygulanan kral suyu prosesinin yüksek altın içeren 3 farklı atık için uygulanması araştırılmıştır. Bu aşamada farklı CPU, board ve konektörlerin kral suyu prosesi ile elde edilen altın miktarları belirlenmiştir.

4.1.1. Cep Telefonu-1

Kullanım ömrünü tamamlamış X marka cep telefonunun öncelikle metal ve plastik aksamları ayrıştırılmış ve değerli metallerin geri kazanımı için elektronik devre kısmı ortaya çıkarılmıştır. Şekil 4.1'de cep telefonu-1'in ayrıştırılan metal, plastik ve devre kısımları verilmiştir.



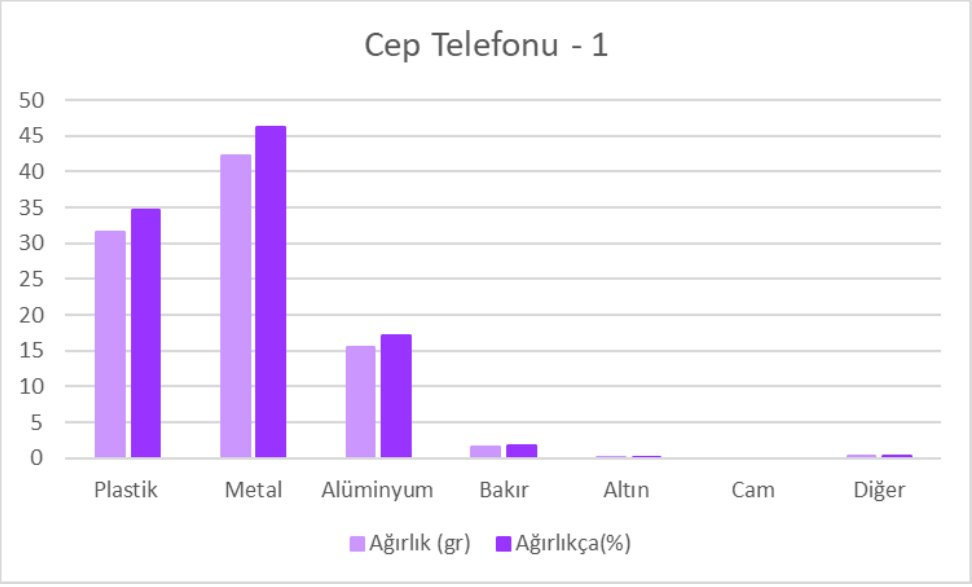
Şekil 4.1. : Cep Telefonu-1 ve Demontaj Aşamaları

Demonte edilen elektronik devre kısımlarının hidrometalurjik yöntemler ile öncelikle kral suyu yöntemi kullanılarak altın geri kazanımı yapılmış ve geri kalan çözeltiye elektroliz yöntemi uygulanarak bakır geri kazanımı yapılmıştır. Elektrolizde kullanılan bakır levhanın ağırlığı: 9,620 gr, elektrolizde kullanılan grafit ucun ağırlığı: 0,518 gr ve elektroliz sonucunda elde edilen bakır: 0,534 gr olarak tespit edilmiştir.

Kral suyu ile geri kazanılan metal miktarlarının belirlenebilmesi için ICP-MS ile gerçekleştirilen analiz sonuçları Tablo 4.1'de yer almaktadır.

Tablo 4.1. : Cep Telefonu-1 Analiz Sonuçları.

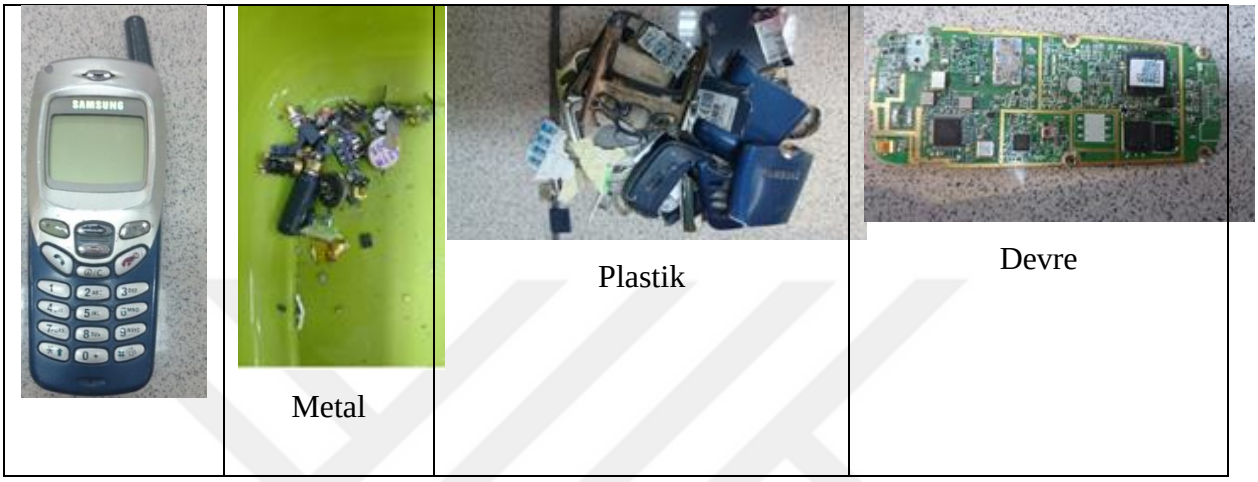
	Ağırlık	Ağırlıkça(%)
Plastik	31,549	34,56
Metal	42,245	46,28
Alüminyum	15,552	17,03
Bakır	1,648	1,82
Altın	0,052	0,056
Cam	0	0
Diğer	0,23	0,26
Toplam	91,276	100



Şekil 4.2. : Cep Telefonu-1 analiz sonuçları

4.1.2. Cep Telefonu-2

Kullanım ömrünü tamamlamış Y marka cep telefonunun öncelikle metal ve plastik aksamları ayrıştırılmış ve değerli metallerin geri kazanımı için elektronik devre kısmı ortaya çıkarılmıştır. Şekil 4.3'de cep telefonu-2'in ayrıştırılan metal, plastik ve devre kısımları verilmiştir.



Şekil 4.3. : Cep Telefonu-2 ve Demontaj Aşamaları

Demonte edilen elektronik devre kısımlarının hidrometalurjik yöntemler ile öncelikle kral suyu yöntemi kullanılarak altın geri kazanımı yapılmış ve geri kalan çözeltiye elektroliz yöntemi uygulanarak bakır geri kazanımı yapılmıştır. Elektrolizde kullanılan bakır levhanın ağırlığı: 9,620 gr, elektrolizde kullanılan grafit ucun ağırlığı: 0,518 gr ve elektroliz sonucunda elde edilen bakır: 0,384 gr olarak tespit edilmiştir.

Kral suyu ile geri kazanılan metal miktarlarının belirlenebilmesi için ICP-MS ile gerçekleştirilen analiz sonuçları Tablo 4.2'de gösterilmektedir.

Tablo 4.2. : Cep Telefonu-2 Analiz Sonuçları.

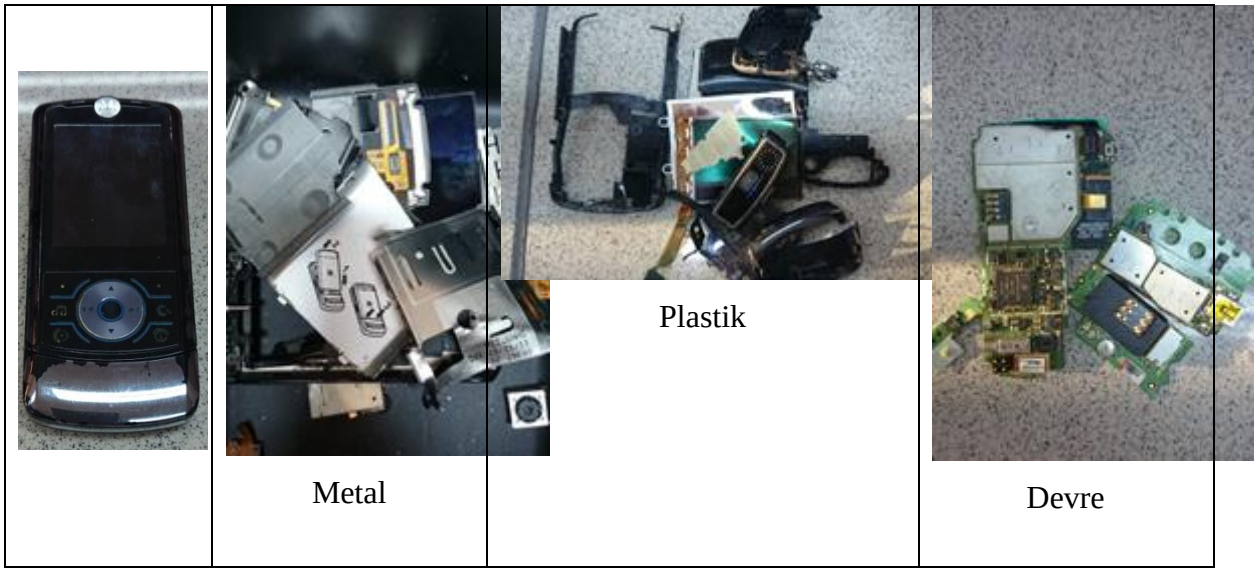
	Ağırlık	Ağırlıkça(%)
Plastik	36,475	41,08
Metal	11,658	13,13
Alüminyum	0,563	0,63
Bakır	1,272	1,45
Altın	0,31	0,34
Cam	0	0
Diğer	38,5	43,37
Toplam	88,778	100



Şekil 4.4. : Cep Telefonu-2 analiz sonuçları

4.1.3. Cep Telefonu-3

Kullanım ömrünü tamamlamış Z marka cep telefonunun öncelikle metal ve plastik aksamları ayrıştırılmış ve değerli metallerin geri kazanımı için elektronik devre kısmı ortaya çıkarılmıştır. Şekil 4.5'de cep telefonu-3'in ayrıştırılan metal, plastik ve devre kısımları verilmiştir.



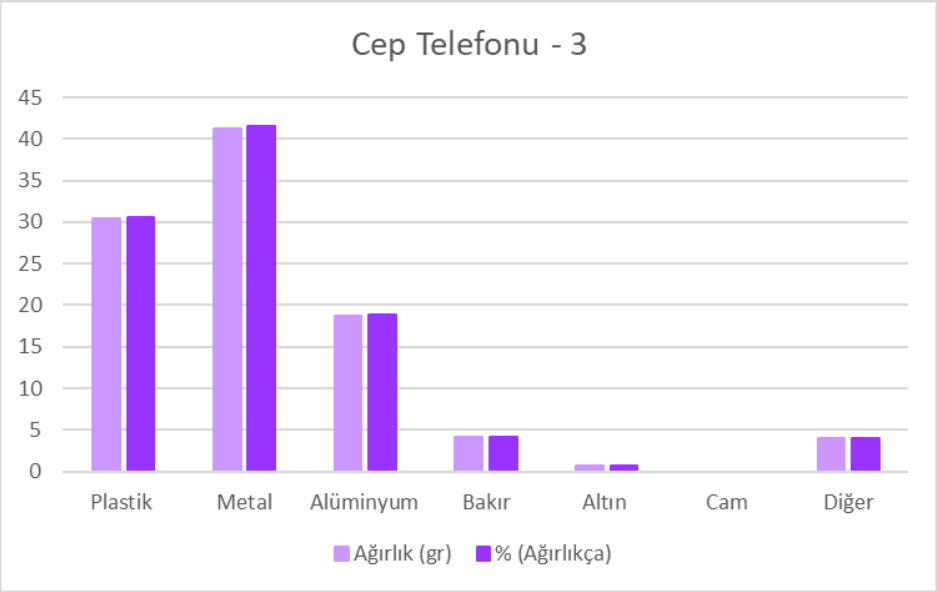
Şekil 4.5. : Cep Telefonu-3 ve demontaj aşamaları

Demonte edilen elektronik devre kısımlarının hidrometalurjik yöntemler ile öncelikle kral suyu yöntemi kullanılarak altın geri kazanımı yapılmış ve geri kalan çözeltiye elektroliz yöntemi uygulanarak bakır geri kazanımı yapılmıştır. Elektrolizde kullanılan bakır levhanın ağırlığı: 15.019 gr, elektrolizde kullanılan grafit ucun ağırlığı: 0,518 gr ve elektroliz sonucunda elde edilen bakır: 3,320 gr olarak tespit edilmiştir.

Kral suyu ile geri kazanılan metal miktarlarının belirlenebilmesi için ICP-MS ile gerçekleştirilen analiz sonuçları Tablo 4.3'de gösterilmektedir.

Tablo 4.3. : Cep Telefonu-3 Analiz Sonuçları.

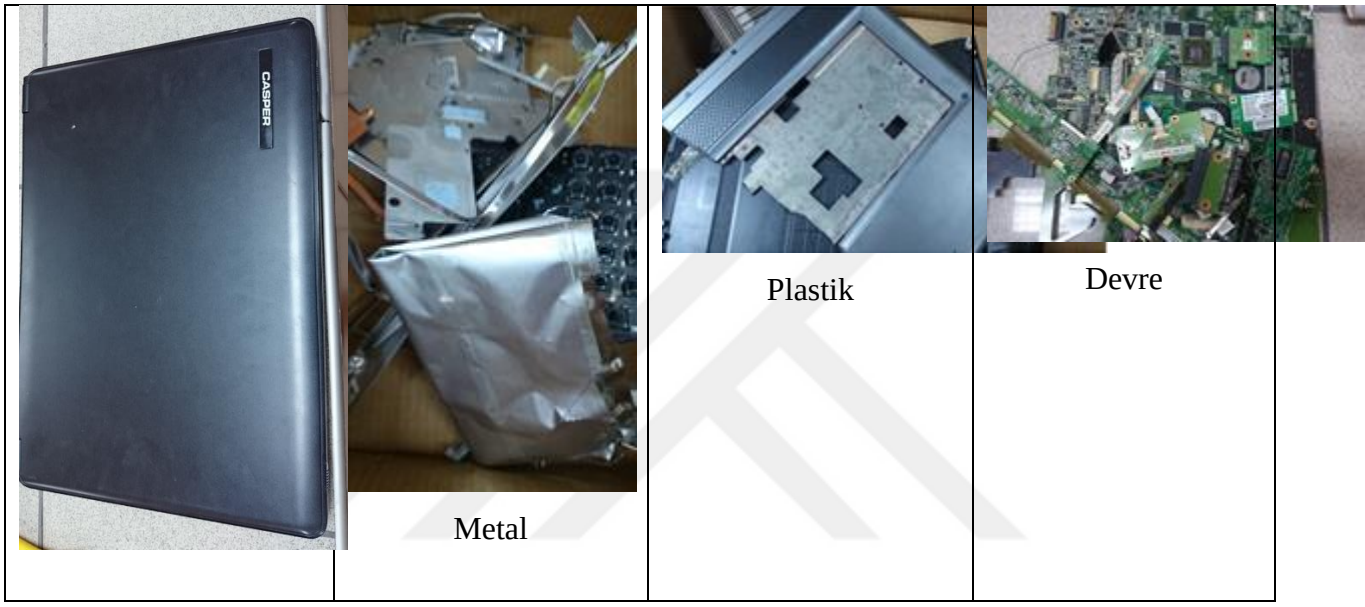
Cep telefonu-3	Ağırlık (gr)	(Ağırlıkça) %
Plastik	30,402	30,63
Metal	41,252	41,57
Alüminyum	18,754	18,89
Bakır	4,161	4,19
Altın	0,715	0,72
Cam	-	-
Diğer	3,945	3,97
Toplam	99,229	100



Şekil 4.6. : Cep Telefonu-3 analiz sonuçları

4.1.4. Dizüstü Bilgisayar

Kullanım ömrünü tamamlamış A marka dizüstü bilgisayarın öncelikle metal ve plastik aksamları ayrıştırılmış ve değerli metallerin geri kazanımı için elektronik devre kısmı ortaya çıkarılmıştır. Şekil 4.7'de dizüstü bilgisayar' ın ayrıştırılan metal, plastik ve devre kısımları verilmiştir.



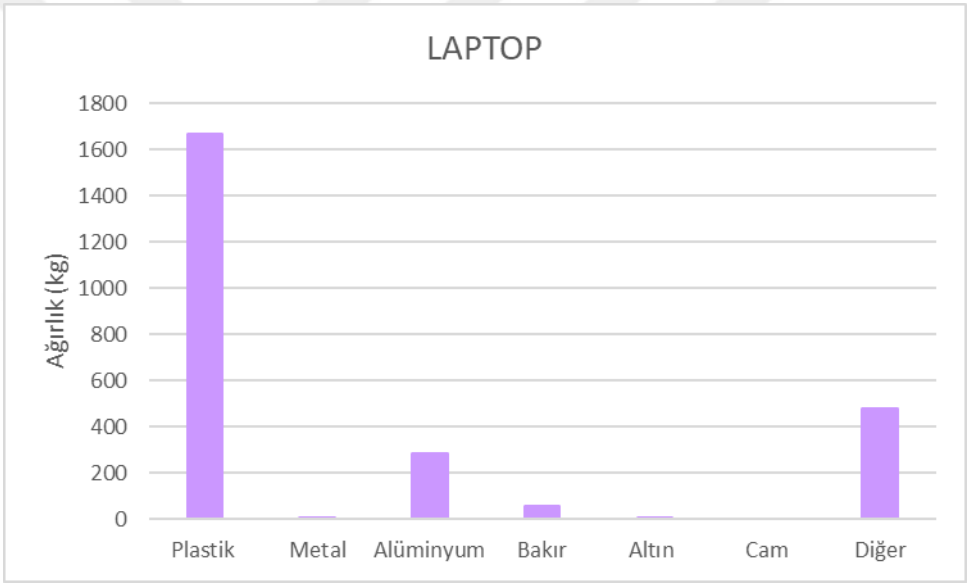
Şekil 4.7. : Dizüstü Bilgisayar ve Demontaj Aşamaları.

Demonte edilen elektronik devre kısımlarının hidrometalurjik yöntemler ile öncelikle kral suyu yöntemi kullanılarak altın geri kazanımı yapılmış ve analiz edilmiştir.

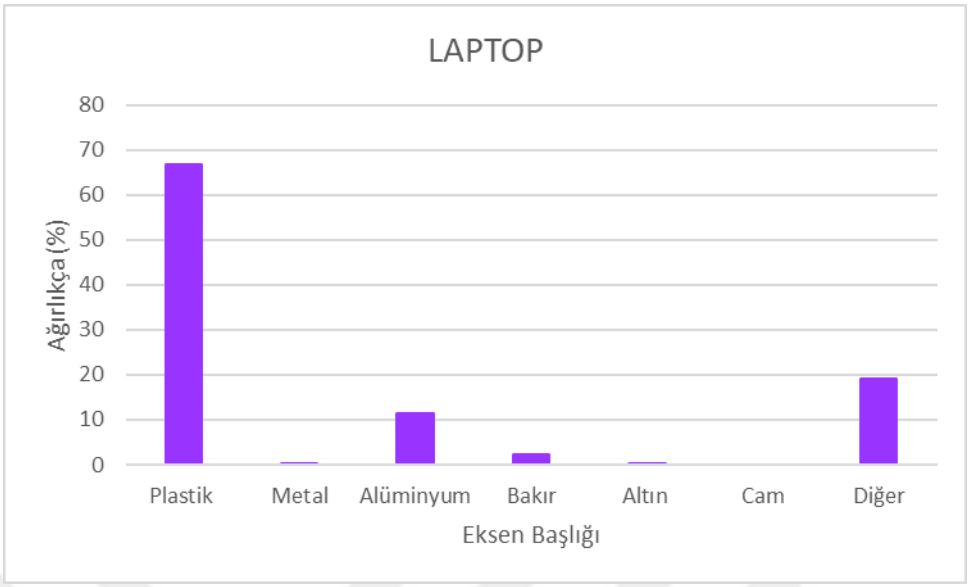
Kral suyu ile geri kazanılan metal miktarlarının belirlenebilmesi için ICP-MS ile gerçekleştirilen analiz sonuçları Tablo 4.4'de gösterilmektedir.

Tablo 4.4. : Dizüstü bilgisayar Analiz Sonuçları.

	Ağırlık (gr)	(Ağırlıkça) %
Plastik	1669	66,76
Metal	0,567	0,022
Alüminyum	286,86	11,47
Bakır	60,48	2,41
Altın	2,579	0,103
Cam	0	0
Diğer	481	19,24
Toplam	2500	100



(a)



(b)

Şekil 4.8. : Dizüstü Bilgisayar analiz sonuçları

4.1.5. Masaüstü Bilgisayar

Kullanım ömrünü tamamlamış B marka masaüstü bilgisayarın öncelikle metal ve plastik aksamları ayrıştırılmış ve değerli metallerin geri kazanımı için elektronik devre kısmı ortaya çıkarılmıştır. Şekil 4.9'da masaüstü bilgisayar'ın ayrıştırılan metal, plastik ve devre kısımları verilmiştir.





Metal



Plastik



Devre

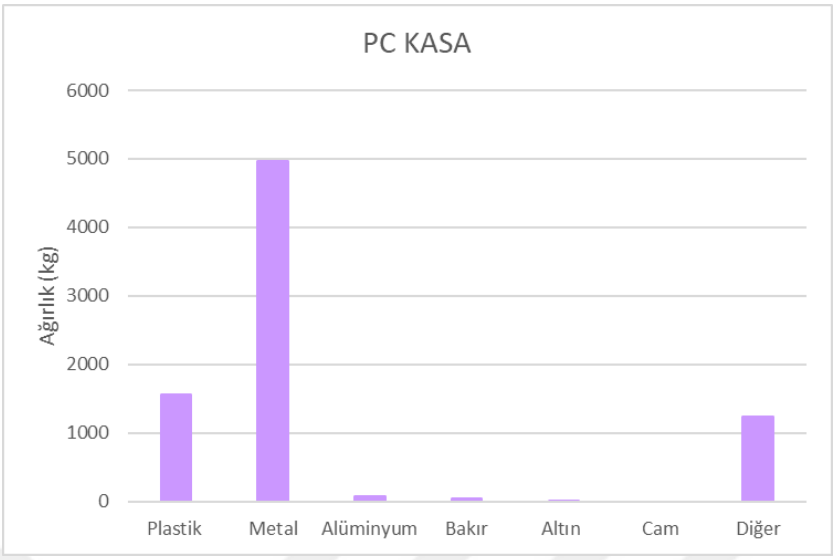
Şekil 4.9. : Masaüstü Bilgisayar ve Demontaj Aşamaları

Demonte edilen elektronik devre kısımlarının hidrometalurjik yöntemler ile öncelikle kral suyu yöntemi kullanılarak altın geri kazanımı yapılmış ve analiz edilmiştir.

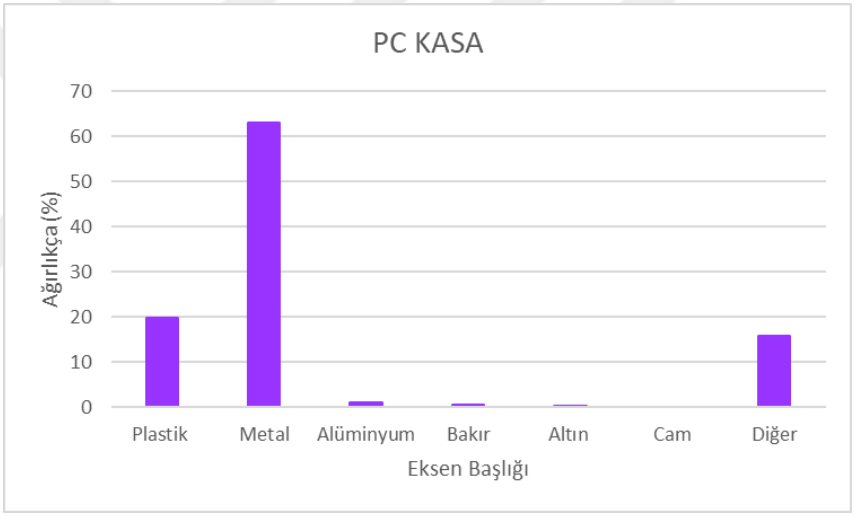
Kral suyu ile geri kazanılan metal miktarlarının belirlenebilmesi için ICP-MS ile gerçekleştirilen analiz sonuçları Tablo 4.5'de gösterilmektedir.

Tablo 4.5. : Masaüstü Analiz Sonuçları.

Bilgisayar (Kasa)	Ağırlık (gr)	(Ağırlıkça) %
Plastik	1567	19,84
Metal	4967	62,87
Alüminyum	73,579	0,93
Bakır	44,833	0,57
Altın	3,934	0,049
Cam	0	0
Diğer	1243	15,74
Toplam	7900	100



(a)



(b)

Şekil 4.10. : Dizüstü Bilgisayar analiz sonuçları

4.1.6. Yazıcı

Kullanım ömrünü tamamlamış C marka lazer yazıcının öncelikle metal ve plastik aksamları ayrıştırılmış ve değerli metallerin geri kazanımı için elektronik devre kısmı ortaya çıkarılmıştır. Şekil 4.11'de lazer yazıcı'nın ayrıştırılan metal, plastik ve devre kısımları verilmiştir.





Metal



Plastik



Devre

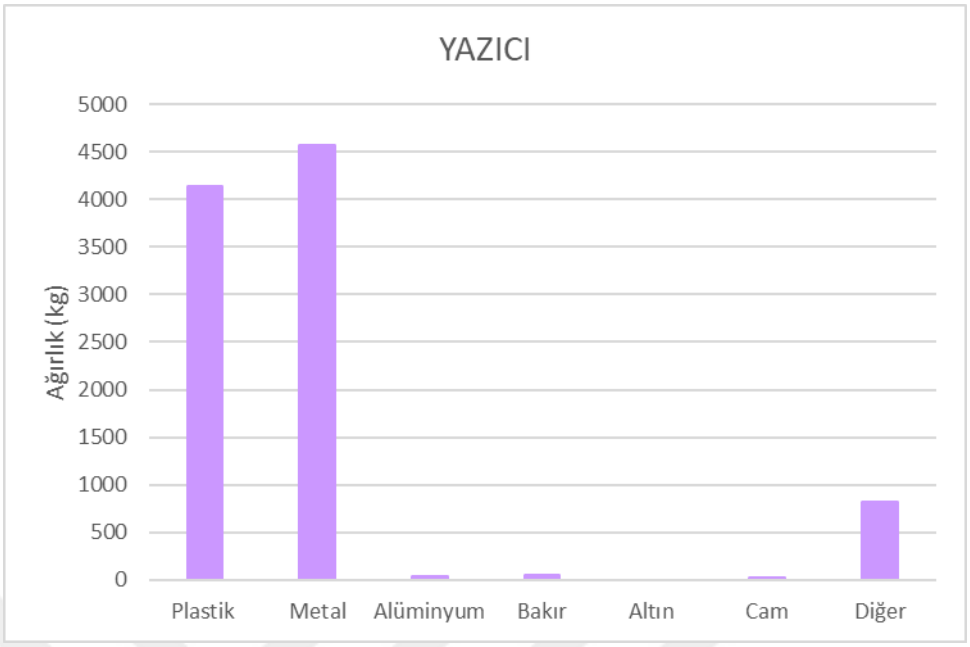
Şekil 4.11. : Yazıcı ve Demontaj Aşamaları

Demonte edilen elektronik devre kısımlarının hidrometalurjik yöntemler ile öncelikle kral suyu yöntemi kullanılarak altın geri kazanımı yapılmış ve analiz edilmiştir.

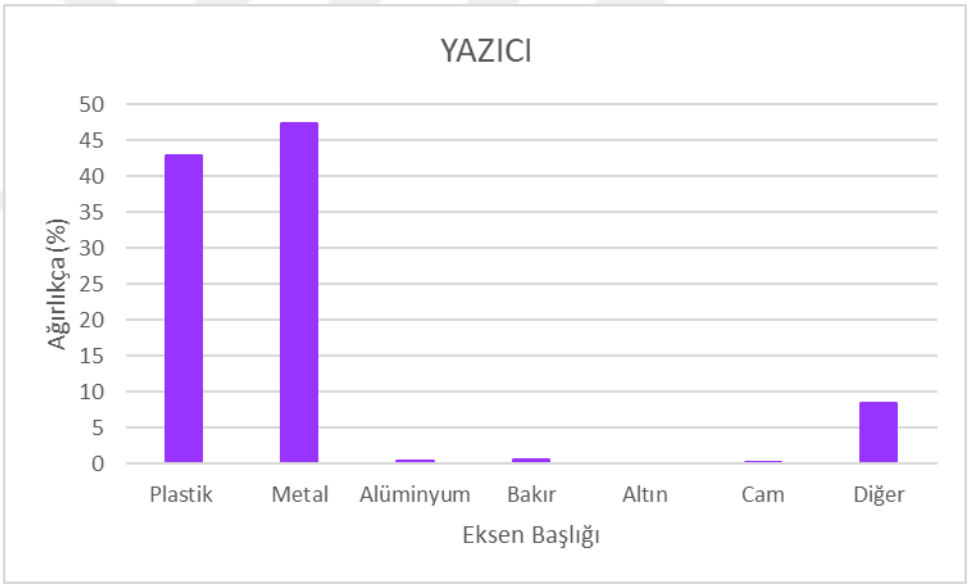
Kral suyu ile geri kazanılan metal miktarlarının belirlenebilmesi için ICP-MS ile gerçekleştirilen analiz sonuçları Tablo 4.6'da gösterilmektedir.

Tablo 4.6. : Yazıcı Analiz Sonuçları.

Yazıcı	Ağırlık (gr)	(Ağırlıkça) %
Plastik	4134	42,84
Metal	4567	47,33
Alüminyum	45,95	0,47
Bakır	54,58	0,56
Altın	-	-
Cam	31,66	0,33
Diğer	817	8,47
Toplam	9650	100



(a)



(b)

Şekil 4.12. : Lazer yazıcı analiz sonuçları

4.1.7. Tüplü Televizyon

Kullanım ömrünü tamamlamış C marka lazer yazıcının öncelikle metal ve plastik aksamları ayrıştırılmış ve değerli metallerin geri kazanımı için elektronik devre kısmı ortaya çıkarılmıştır. Şekil 4.13'de lazer yazıcı'nın ayrıştırılan metal, plastik ve devre kısımları verilmiştir.





Metal



Devre

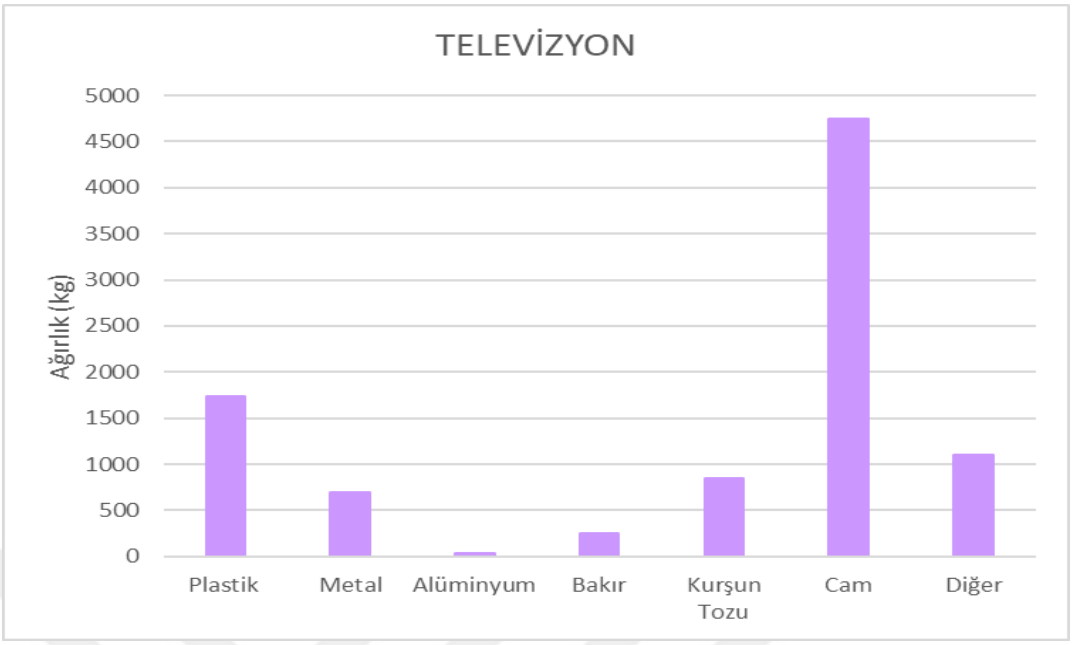
Şekil 4.13. : Televizyon Demontaj Aşamaları.

Demonte edilen elektronik devre kısımlarının hidrometalurjik yöntemler ile öncelikle kral suyu yöntemi kullanılarak altın geri kazanımı yapılmış ve analiz edilmiştir.

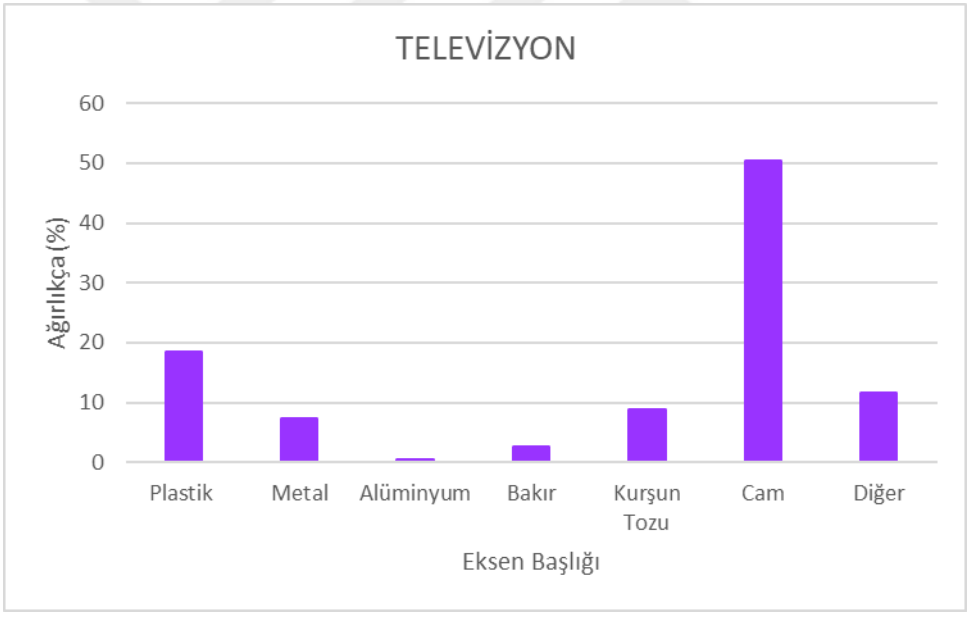
Kral suyu ile geri kazanılan metal miktarlarının belirlenebilmesi için ICP-MS ile yapılan analiz sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir. Ancak altın geri kazanımı mümkün olmamıştır.

Tablo 4.7. : Tüplü Televizyon Analiz Sonuçları.

Televizyon	Ağırlık (gr)	(Ağırlıkça) %
Plastik	1732	18,43
Metal	695,73	7,44
Alüminyum	42,82	0,46
Bakır	247,55	2,64
Kurşun Tozu	845,3	8,9
Cam	4740	50,4
Diğer	1102	11,73
Toplam	9400	100



(a)



(b)

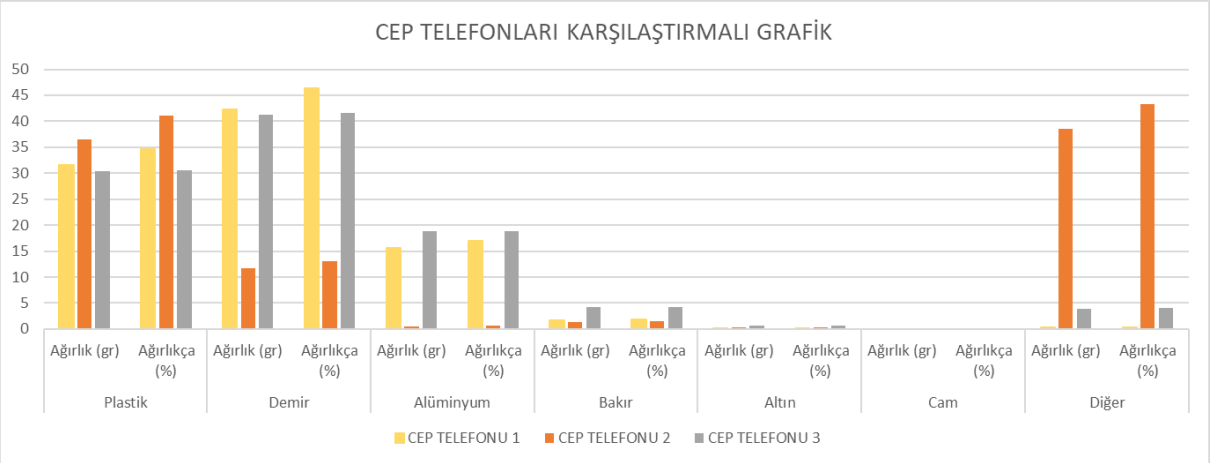
Şekil 4.14. : Tüplü Televizyon analiz sonuçları

4.2. ELEKTRONİK ATIKLARIN BİLEŞİMİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Elektronik atıkların farklı kullanım alanları ve özellikleri nedeniyle, çok farklı bileşimler ortaya çıkmıştır. Özellikle digital kart ve işlemciye sahip cep telefonu, dizüstü bilgisayar ve masaüstü bilgisayarda belirlenen kıymetli metaller dikkate değer miktardadır. Kişisel kullanıma ait elektronik atıkların bileşimi Tablo 4.8'de ve Şekil 4.15'de gösterilmektedir.

Tablo 4.8. : Genel Analiz Sonuçları.

Numune	Plastik		Demir		Alüminyum		Bakır		Altın		Cam		Diğer	
	Ağ.	%	Ağ.	%	Ağ.	%	Ağ.	%	Ağ.	%	Ağ.	%	Ağ.	%
CEP TELEFONU I	31,5	34,56	42,24	46,28	15,55	17,03	1,764	1,8	0,05	0,05	-	-	0,23	0,26
CEP TELEFONU II	36,4	41,08	11,65	13,13	0,563	0,63	1,296	1,4	0,31	0,34	-	-	38,5	43,3
CEPTELEFONUIII	30,4	30,63	41,25	41,57	18,75	18,89	4,161	4,1	0,71	0,72	-	-	3,94	3,97
DİZÜSTÜ	1669	66,76	0,567	0,022	286,8	11,47	60,48	2,4	2,57	0,10	-	-	481	19,2
MASAÜSTÜ	1567	19,84	4967	62,87	73,57	0,93	44,83	0,5	3,93	0,04	-	-	124	15,7
YAZICI	4134	42,84	4567	47,33	45,95	0,47	54,58	0,5	-	-	31,6	0,3	817	8,47
TELEVİZYON	1732	18,43	695,7	7,44	42,82	0,46	247,5	2,6	845,	8,9	474	50,	110	11,7



Şekil 4.15. : Çeşitli elektronik atıkların bileşiminin karşılaştırılması

Ankara'da bulunan akredite laboratuvar sonuçlarına göre Motorola(2), Laptop ve Bilgisayar Kasası analiz sonuçları aşağıdaki tabloda belirtildiği gibidir:

Tablo 4.9. : ICP-MS Analiz Sonuçları.

CERTIFICATE OF ANALYSIS ANK15000384.1

	Method	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200
	Analyte	Mo	Cu	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	Mn	Fe	As	Au	Th	Sr	Cd	Sb	Bi	V	Ca	P	La
	Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppb	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	ppm
	MDL	0.1	0.1	0.1	1	0.1	0.1	0.1	1	0.01	0.5	0.5	0.1	1	0.1	0.1	0.1	2	0.01	0.001	1
3.numune	Rock Pulp	3.5	>10000	118.2	2911	>100	>10000	81.8	273	12.92	27.9	>100000	<0.1	1363	<0.1	205.8	10.6	<2	0.10	0.005	<1
4.numune	Rock Pulp	5.5	>10000	79.4	>10000	>100	7895.4	62.9	301	14.96	10.1	>100000	0.3	71	1.3	126.0	184.4	<2	0.14	0.025	<1
5.numune	Rock Pulp	1.0	>10000	392.2	>10000	>100	4911.4	47.5	145	7.73	9.1	51115.1	0.2	50	<0.1	124.7	11.4	<2	0.17	0.010	6

	Method	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200	AQ200
	Analyte	Cr	Mg	Ba	Ti	B	Al	Na	K	W	Hg	Sc	Tl	S	Ga	Se	Te
	Unit	ppm	%	ppm	%	ppm	%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm
	MDL	1	0.01	1	0.001	20	0.01	0.001	0.01	0.1	0.01	0.1	0.1	0.05	1	0.5	0.2
3.numune	Rock Pulp	572	0.07	52	0.658	>2000	0.08	0.024	0.02	3.7	<0.01	<0.1	3.5	3.34	23	<0.5	6.8
4.numune	Rock Pulp	397	0.01	16	0.172	114	0.24	0.013	<0.01	5.3	0.02	0.2	<0.1	6.31	<1	1.8	2.9
5.numune	Rock Pulp	19	<0.01	32	0.151	128	0.23	0.008	<0.01	1.8	0.02	<0.1	<0.1	3.16	<1	2.4	0.4

4.3. CPU, BOARD VE KONEKTÖRLERDEN KRAL SUYU İLE ALTIN GERİ KAZANIMI

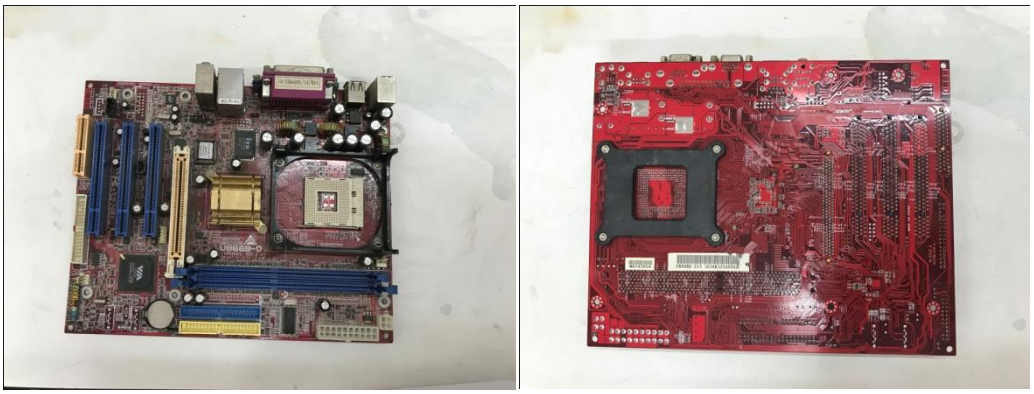
Çalışmamızın ikinci aşamasında, elektronik atıkların geri kazanımı amacıyla uygulanan kral suyu prosesinin yüksek altın içeren 3 farklı atık için uygulanması araştırılmıştır. Bu aşamada farklı CPU, board ve konektörlerin kral suyu prosesi ile elde edilen altın miktarları belirlenmiştir.

Elektronik atık geri dönüşümü şirketinden temin edilen board, CPU ve konektörlerin ağırlıkları belirlendikten sonra kral suyu yöntemi uygulanmış ve geri kazanılan altın miktarları tespit edilmiştir.

4.3.1. Boardlar

Elektronik atık geri kazanımında öncelikli olarak ele alınan atık türlerinden boardlar, oldukça değişken tip ve modellerde üretilmektedir. Çalışmamızda kullanılan 4 farklı tip ve ağırlıktaki boardlara ait görünümler Şekil 4.16, 4.17, 4.18 ve 4.19 da verilmiştir.

2.1.1.1.Board 1



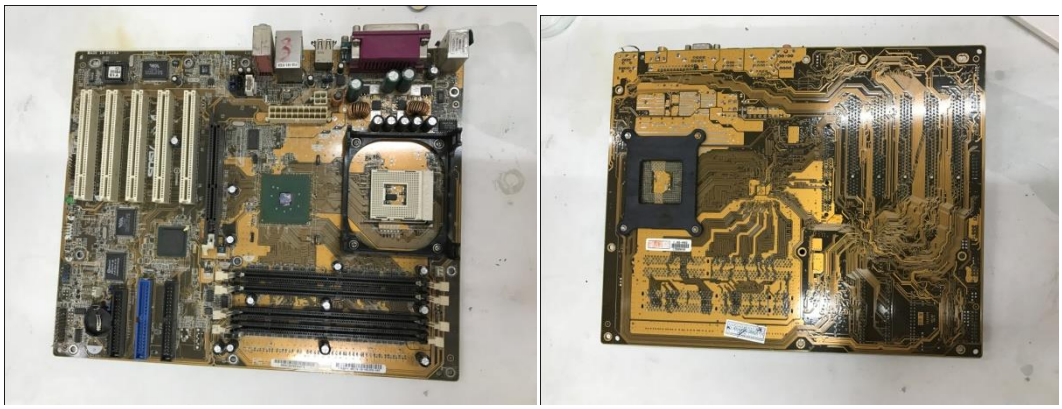
Şekil 4.16. : Board (1) görünüşü

2.1.1.2.Board 2



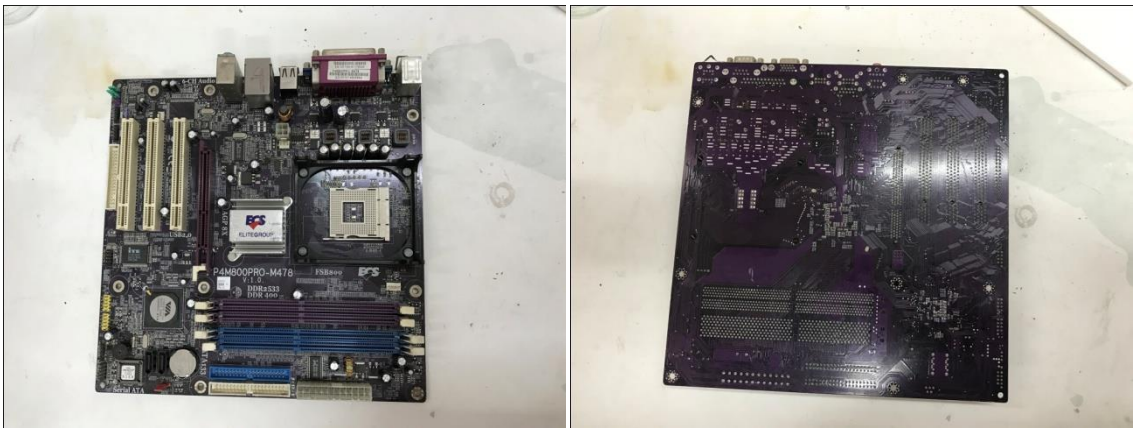
Şekil 4.17. : Board (2) görünüşü

2.1.1.3.Board 3



Şekil 4.18. : Board (3) görünüşü

2.1.1.4.Board 4



Şekil 4.19. : Board (4) görünüşü

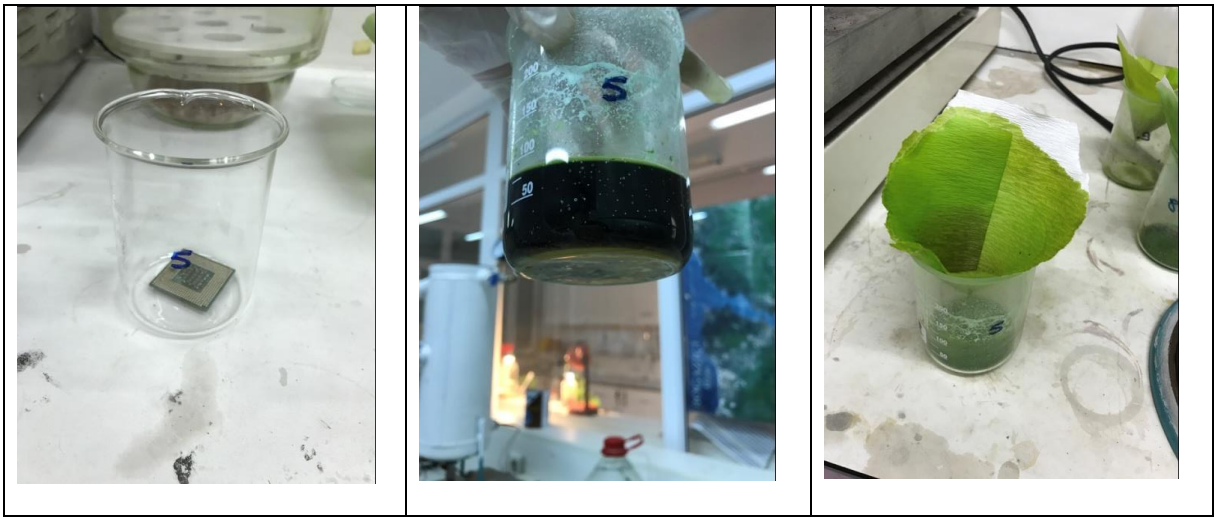
Boardlar için uygulanan deneysel çalışmalar sonucunda, atık ağırlığı ile elde edilen altın miktarları Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10. : Board Analiz Sonuçları.

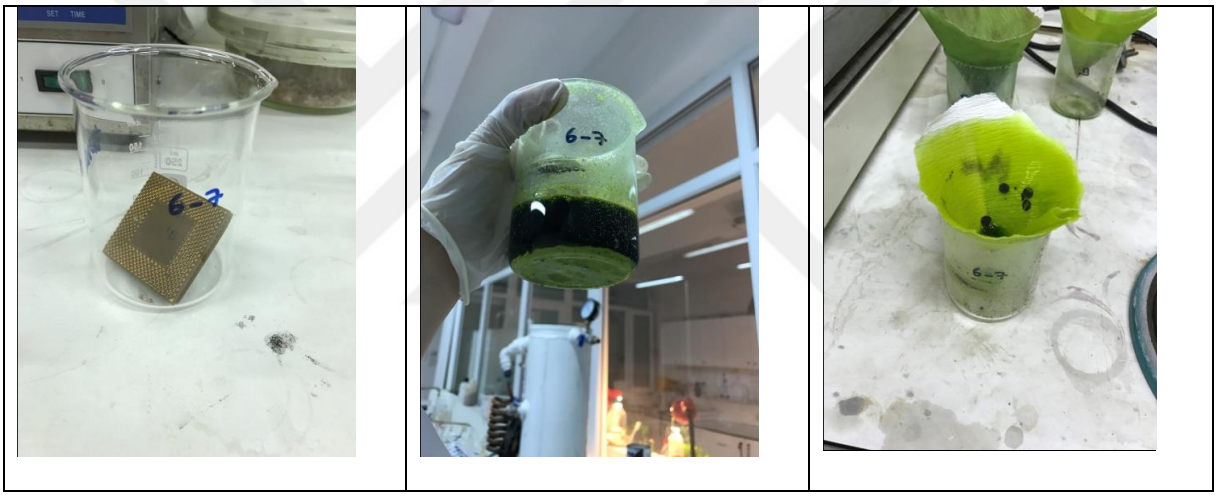
	Atık ağırlığı, gr	Altın	Altın, gr
Board 1	546,44	0,052	1,2
Board 2	466,85	0,052-0,056	1,03
Board 3	599,24		1,32
Board 4	530,29	0,052-0,056	1,17

4.3.2. CPUlar

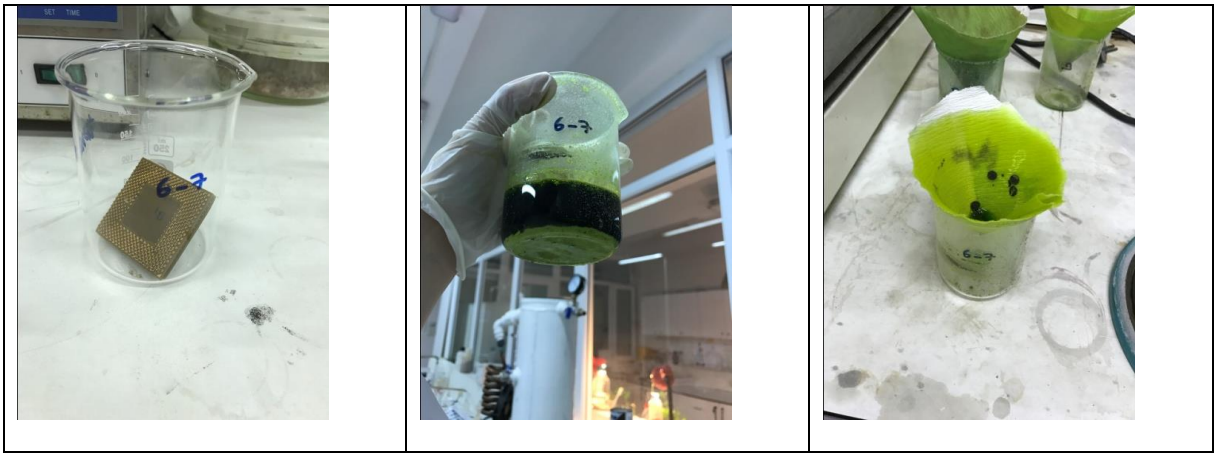
Elektronik atık geri kazanımında en yüksek altın içeriğine sahip atık türlerinden CPUlar, üretim teknolojilerine bağlı olarak oldukça değişken tip ve modellerde üretilmektedir. Çalışmamızda kullanılan 6 farklı tip ve ağırlıktaki boardlara ait görünümler Şekil 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 ve 4.25 de verilmiştir.



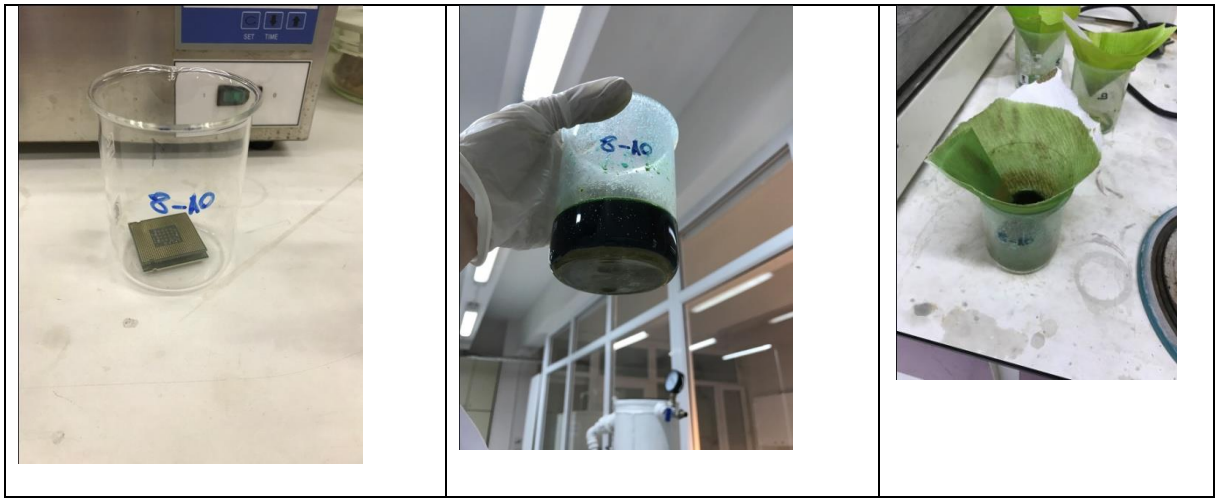
Şekil 4.20. : CPU (5) görünüşü ve işlemleri.



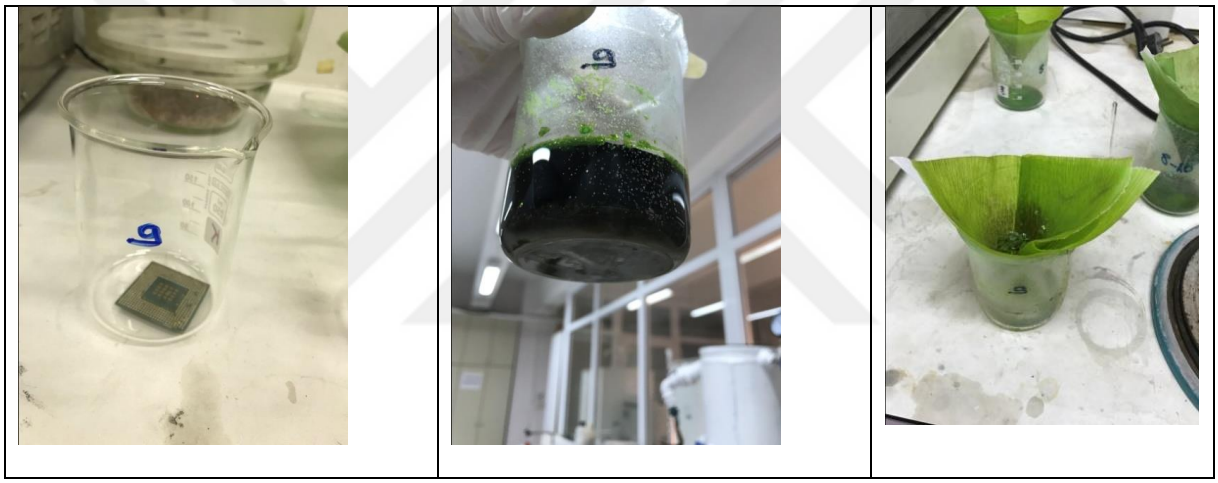
Şekil 4.21. : CPU (6) görünüşü ve işlemleri.



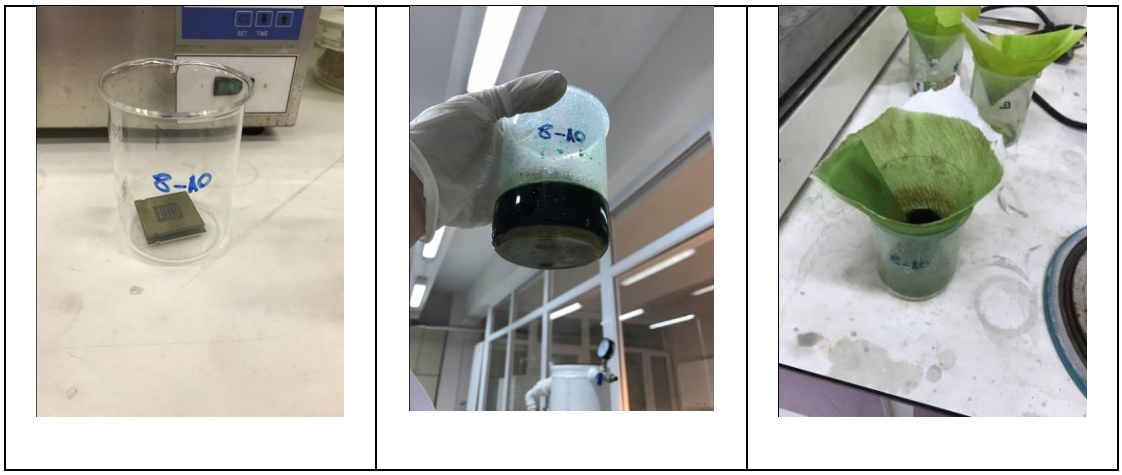
Şekil 4.22. : CPU (7) görünüşü ve işlemleri.



Şekil 4.23. : CPU (8) görünüşü ve işlemleri.



Şekil 4.24. : CPU (9) görünüşü ve işlemleri



Şekil 4.25. : CPU (10) görünüşü ve işlemleri

CPU'lar için uygulanan deneysel çalışmalar sonucunda, atık ağırlığı ile elde edilen altın miktarları Tablo 4.11'de gösterilmektedir.

Tablo 4.11. : CPU Analiz Sonuçları.

	Atık ağırlığı, gr	Altın, %	Altın, gr
CPU 5	19,6975		0,12
CPU 6	11,1465		0,0712
CPU 7	11,1146		0,0712
CPU 8	22,2160		0,1312
CPU 9	18,7938		0,11
CPU 10	22,5855		0,1312

4.3.3. Konektörler

Elektronik atık geri kazanımında çok sıklıkla ele alınmayan ancak CPU ve Boardlar ile birlikte değerli metal geri kazanımında işleme tabi tutulan atıklar konektörlerdir. Çalışmamızda kullanılan tek bir konektöre ait görünümler Şekil 4.26 da gösterilmektedir.



Şekil 4.26. : Konektör görünüşü

Konektörler ile yapılan kral suyu denemelerinde, 144,93 gr atık ağırlığı ile çalışılmıştır. Kral suyu prosesi sonrasında 0,29 gr altın geri kazanımı belirlenmiştir.

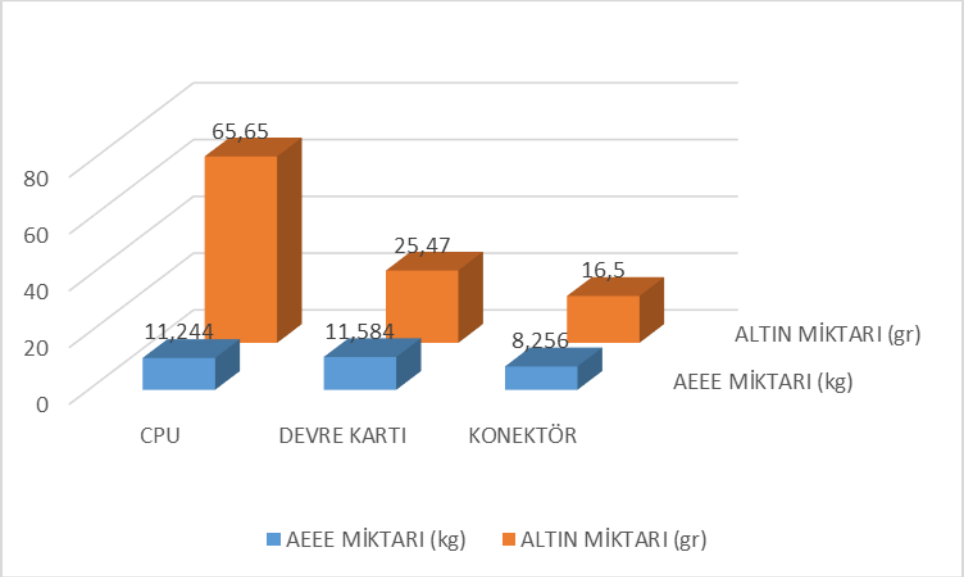
4.4. EKONOMİK ANALİZ

Tablo 4.12’ de gelir ve giderlerin birim fiyatları gösterilmiştir. Yıllık veriler kullanılarak işletme için ayrı ayrı elektrik, su işçilik ve ekipman maliyetleri gösterilmiştir.

Doğru bir ekonomik analiz için sermaye miktarı ve işletme maliyetleri belirlenmelidir. İşletmede akış diyagramında bulunan her bir ekipmanın yatırım maliyetinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi ve yatırım destekleri için iyi bir gelir / gider özeti hazırlanmalıdır. İşletme maliyetlerinin tahmini için çeşitli modeller kurgulanarak en uygun ve en verimli ekipman tercihi yapılmalıdır. İşletmenin birim maliyetleri belirlenirken, AEEE, kira, kimyasallar, enerji, işçilik gibi giderler hesaplanmalıdır. Aylık Gelir / Gider hesapları yapılarak gelir tablosu oluşturulur. İşletme yatırımına ilişkin sektörel ve bölgesel teşvik ve destekler belirlenmelidir. İşletme yatırımına ilişkin destek ve teşvikler hem enerji hem de iş gücü için olmalıdır.

Tablo 4.12. : Geri Kazanım Süreci İçin İşletme Birim Maliyetleri

Giderler	Birim	Tutar
Enerji	$/kW-	0,1
Çalışma Süresi	Gün/Yıl	250
Personel Maaşı	$/Saat	6,2
Kira Giderleri	$/m2-Ay	3,2
Geri Kazanılan	Ton/yıl	5,2
Kimyasallar	$/L	0,25
Atık Su	$/m3	110



Şekil 4.27. : CPU, Devre Kartı, Konektörlerin Geri Kazanımından Elde Edilen Altın Miktarı

Prosesin gelirleri hesaplanırken ilk olarak Kral Suyunun ekonomik analizi yapılmıştır. Tesise kabul edilen AEEE'lerin içerdiği Altın miktarı yaklaşık olarak tahmin edilebilir ancak değişken AEEE miktarı1 göz önüne alındığında süreç içerisinde yeniden belirlenmelidir. Geri Kazanım işlemine tabi tutulan AEEE miktarındaki ortalama Altın miktarları Şekil 4.27'de gösterilmiştir.

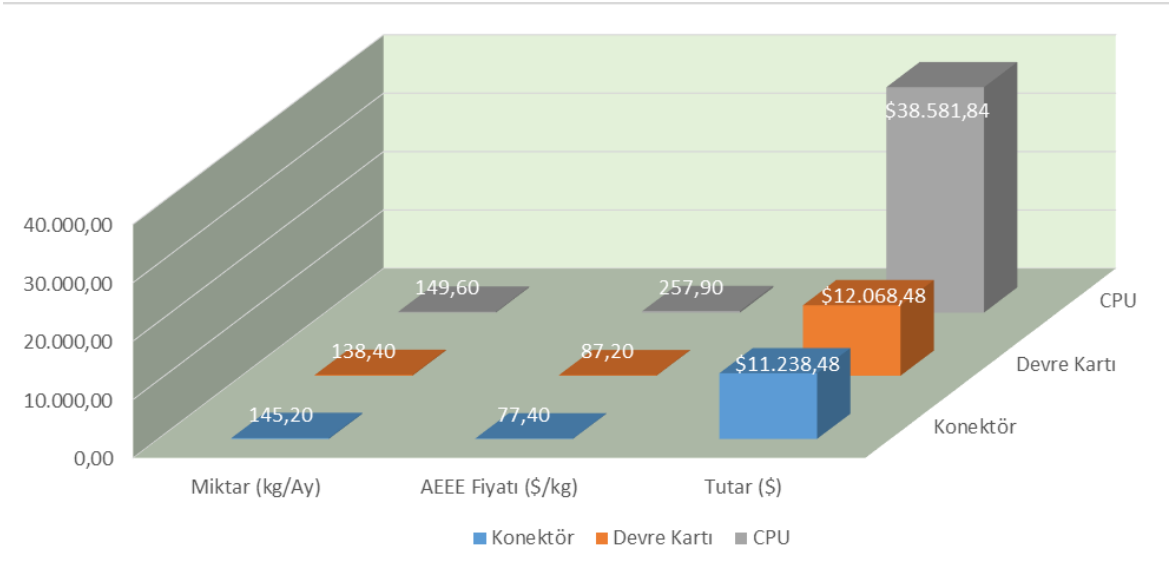
Tesiste işlenen CPU, Devre Kartı ve Konektör ağırlıkları oldukça değişkenlik göstermektedir. Buna göre tesiste işlenen CPU, Devre Kartı ve Konektör içerisinde bulunan altın miktarları sırasıyla 5,85 gr/kg, 2,2 gr/kg ve 2 gr/kg dır. Altın cevherinden çıkarılan altın miktarı (3-9 gr/ton-cevher) ile karşılaştırıldığında geri kazanımdan elde edilen altın miktarının daha verimli olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca bu işlemler sonrasında prosesten bakır ve paladyum da kazanılmıştır. Ancak altın satışları temel geliri oluşturmaktadır. Tablo 4.12' de verilen birim maliyetler değerlendirilerek AEEE geri kazanım sürecine yönelik yapılmış aylık gider hesabı Tablo 4.13 de gösterilmiştir. Özellikle işçilik, ekipman ve kira giderleri işletmenin en yüksek giderleri olarak gözlemlendi. Kral suyu prosesi için giderlerin dağılımı değerlendirildiğinde maliyetlerin yaklaşık olarak

%75'inin işçilik, ekipman ve kira bedellerinden oluştuğu görülmektedir. İşletmede kullanılan enerji, atıksu, su ve kimyasalların bedellerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.

Geri kazanım prosesi için harcanan kira ve işçilik giderlerinin farklı yer ve şehirlerdeki değişimi dikkate alınmalıdır. Ancak su, atıksu, kimyasal ve enerji giderlerinde önemli bir farklılık görülmemektedir. Kral suyu prosesinin maliyeti CPU, devre kartı ve konektör için değişmezken, bu AEEE'lerden elde edilen altın miktarları değişiklik göstermektedir. Bu nedenle geri kazanılan altın miktarı her bir AEEE için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Tablo 4.14' de her bir AEEE türü için kazanılan altın miktarı gösterilmiştir.

CPU dan geri kazanılarak elde edilen altının miktarı diğer AEEE lere göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Altının birim fiyatları değişkenlik gösterebileceği için toplam gelirde aylara göre değişkenlik gösterebilmektedir. AEEE'lere geri kazanım işlemi için ödenen tutar ve miktarına ilişkin bilgiler Şekil 4.28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.28. : AEEE'lerin Aylık Bedelleri

AEEE'lerin geri kazanımı için fayda maliyet analizi yapıldığında Hidrometalurjik yöntemin gelirleri ekonomik olarak karlı bir geri kazanım modeli olarak görülmektedir. CPU, devre kartları ve konektörlerin çevresel etkileri bulunmaktadır. Hidrometalurjik yöntemlerle bu AEEE'lerin geri kazanımı çevresel etkilerini azaltmak ve ekonomik gelir elde etmek için uygun olduğu görülmektedir.

Tablo 4.13. : Hidrometalurjik Yöntem İçin Aylık Gider Analizi

	Kira	Ekipman	Enerji	Kimyasal	İşçilik	Su	Atıksu	Toplam
Gider ($/Ay)	$1.750,00	$2.100,00	$300,00	$490,00	$1.975,00	$95,00	$460,00	$7.170,00

Tablo 4.14. : Hidrometalurjik Yöntemlerle Geri Kazanılan Altın Gelir Analizi

AEEE	Miktar (kg/Ay)	Altın (Au) (gr)	Altın Birim Fiyat ($/gr)	Toplam Gelir ($/Ay)
CPU	149,60	873,70	$47,00	$41.063,90
Devre Kartı	138,40	305,56	$47,00	$14.361,32
Konektör	145,20	290,23	$47,00	$13.640,81
Toplam	433,20	1.469,49		$69.066,03

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Elektronik Atıklardan Kimyasal Yöntemlerle Değerli Metallerin Geri Kazanımı' başlıklı çalışmamız iki aşamalı olarak planlanmıştır. İlk aşamada, kişisel kullanıma sunulan ömrünü tamamlamış cep telefonu, bilgisayar, televizyon ve yazıcı gibi elektronik atıkların bileşenleri belirlenerek geri kazanım metotları uygulanmıştır.

Çalışmalarda kullanılan 3 farklı marka ve model cep telefonunda plastik, metal, alüminyum, bakır ve altın miktarları belirlenmiştir. Büyük oranda plastik (% 30 – 41) ve metal (% 13 – 46) içeren cep telefonlarında % 1 – 17 oranında alüminyum ve % 1,45 – 4,19 oranında bakır belirlenmiştir. Yüksek miktarda altın içeriği bilinen cep telefonlarında, sırasıyla 0,052 gr, 0,715 gr ve 0,31 gr altın belirlenmiştir.

Dizüstü ve masa üstü bilgisayarlarda da yoğunlukla plastik (% 66 – 19) ve metal (% 1 – 62) aksamlar belirlenmiştir. Ancak dizüstü bilgisayarlarda hafif aksamlar tercih edildiğinden % 11 oranında alüminyum dikkate değerdir. Bakır bileşenleri benzer olarak % 0,5 ile 2,4 arasında değişmektedir. Bununla birlikte, her iki elektronik atığın ana kartlarında yer alan altın miktarı ise, dizüstü bilgisayar için 2,579 gr ve masaüstü bilgisayar için 3,934 gr gibi yüksek değerlerde belirlenmiştir.

Ofis veya ev için kullanılan yazıcılarda diğer atıklardan farklı olarak % 42 plastik, % 47 metal, % <1 alüminyum, % <1 bakır belirlenmekle birlikte altın içeriği tespit edilmemiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında son olarak, kullanım ömrünü tamamlamış tüplü bir televizyonun bileşimi ortaya konulmuş ve % 18 plastik, % 7 metal, % <1 alüminyum, % 2,6 bakır, % 8,9 kurşun ve yüksek miktarda (% 50) cam belirlenmiştir.

Ülkemizdeki elektronik atık sektöründe büyük bir paya sahip olan ve yüksek miktarda altın içeren cep telefonları, her yıl yaklaşık 12 milyon adet satılmaktadır. Ortalama 2,5 yıl kullanım ömrü ile birlikte düşünüldüğünde, 2016 yılında piyasaya sürülen cep telefonlarının 2019 yılı 6. ayında oluşturabileceği atık potansiyeli (cep telefonu ağırlığının 100 gr olduğu kabulüyle) 1.200 ton civarındadır. Ayrıca 1 adet atık cep telefonu için ortalama 0,3 gr altın içeriği ile 3,6 ton altın geri kazanma potansiyeli bulunmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, endüstriyel tesisler ve işletmelerden kullanılan ve yaygın atık toplama operasyonlarında toplanan board, CPU ve konektörlerin bileşenleri belirlenerek geri kazanım metotları uygulanmıştır.

Birçok bileşenlerinden ayrılmış ve demontajı yapılmış 4 farklı board için 1,03 ile 1,32 gr arasında değişen altın bileşimleri dikkate değerdir. 466 – 599 gr aralığında değişen toplam atık ağırlığı dikkate alınırsa boardlarda %o2 oranında altın bulunmaktadır.

Benzer olarak, bilgisayarlardan ayrılmış veya demontajı yapılmış 6 farklı CPU için 0,0712 ile 0,1312 gr arasında değişen altın bileşimi belirlenmiştir. 11 – 22 gr aralığında değişen toplam atık ağırlığı dikkate alınırsa boardlarda % 0,6 oranında altın bulunmaktadır. Günümüzde altın madenciliği yapılan sahaların kârla işletilebilmesi için altın cevherlerinde en düşük tenor yaklaşık 1 gram/ton olmalıdır ve çalışmada belirlenen altın miktarı bu değerin 6 katıdır.

Konektörler ile yapılan kral suyu denemelerinde ise 144,93 gr atık ağırlığı ile 0,29 gr altın geri kazanımı belirlenmiştir.

Çalışmanın son bölümünde elektronik atıklar için geri kazanım çalışmalarındaki ekonomik boyutun analizi yapılmıştır. İşletmelerin birim maliyetleri belirlenerek, AEEE maliyeti, kira, kimyasallar, enerji, işçilik gibi giderler hesaplanmıştır.

Nispeten yüksek miktarda altın geri kazanımı sağlarken, çözeltilerin ve elektronik atıklar için yüksek maliyetler hesaplanmıştır. İşlemciden, ana karttan ve konektörden kral suyu işlemi ile elde edilen altın geri kazanımı oldukça karlı bulunmuştur. Değerli metallerin elektronik atıklardan geri kazanılmasında en ekonomik çözüm ayrıca minimum atık yaratan çözümler gereklidir. Hem atık yönetimi hem de geri dönüşüm faaliyetleri öncelikle çevresel özellikler açısından dikkate alınmalıdır. Bu ekonomik analiz ve fizibilite çalışmaları sonuçlarıyla birçok araştırmaya konu olan elektronik atıkların geri kazanımı araştırmalarına yön verebilecek ve karar mekanizmasına yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

Akın, B., & Kuru, A. (2013). Elektrikli ve Elektronik Atıkların (E-Atık) Zararları, Yönetimi, ve Türkiye'deki Uygulamalarının Değerlendirilmesi. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 1-12. https://dergipark.org.tr/download/article-file/319350 adresinden alındı

Antrekowitsch, H., Potesser, M., Spruzina, W., & Prior, F. (2006). Metallurgical Recycling of Electronic Scrap. *EPD Congress*, (s. 899-902). Texas.

Balde, K., Forti, V., Vanessa, G., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *The Global E-Waste Monitor 2017.* Vienna: United Nations University.

Balde, K., Wang, F., Huisman, J., Kuehr, R., & Wong, J. (2015). *The Global E-Waste Monitor 2014.* Bonn: United Nations University.

EUROSTAT. (2017). New Techniques and Technologies for Statistics 2017. *New Techniques and Technologies for Statistics 2017.* Brüksel.

Hobikoğlu, E. H. (2013). Davranışsal Finans Çerçevesinde E-Atık Geri Dönüşüm Yatırım Risk Algılamasında Tüketici Tercih ve Davranış Düzeyinin Sosyo-Ekonomik Analizi: İstanbul Örneği. *Finansal Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi*, 55-70. marmara.edu.tr. adresinden alındı

Kahraman, A. C. (2014, Kasım). Avrupa Birliği Uyum Sürecinde Türkiye'de E-Atık Yönetimi ve Uygulamaya Yönelik Stratejik Analizler. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul, İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi. https://www.researchgate.net/profile/Ahmet_Kahraman3/publication/294578303_E-WASTE_MANAGEMENT_IN_TURKEY_AND_STRATEGIC_ANALYSIS_TOWARDS_IMPLEMENTATION_WITHIN_THE_EU_HARMONIZATION_PROCESS/links/56c1d20208aee5caccf99487.pdf?origin=publication_list adresinden alındı

MAM, T. (2018). *TÜBİTAK MAM Kimyasal Teknoloji Enstitüsü*. http://kte.mam.tubitak.gov.tr/tr: http://kte.mam.tubitak.gov.tr/tr/arastirma-alanlari/uygulamali-elektrokimyasal-prosesler adresinden alındı

Özkan, A. (2018). Atık Baskılı Devre Kartlarından Değerli Metal Geri Kazanım Yöntemlerinin Çok Ölçütlü Karar Verme Teknikleri ile Değerlendirilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 529-537.

Sayman, R. Ü., & Akbulat, O. (2016). *Study on Collection Rates of WEEE.* Ankara: REC.

Sayman, R. Ü., Akpulat, O., & Cesar, C. N. (2011). *Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar Direktif (AEEE) (2002/96/EC) Düzenleyici Etki Analizi.* Ankara: REC.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2012, Mayıs 22). ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYALARIN KONTROLÜ YÖNETMELİĞİ. *(28300)*. Ankara, Türkiye: Resmi Gazete. http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/05/20120522-5.htm adresinden alındı

Talınlı, İ., & Tunçer, E. (2014, Haziran). Elektrik Ve Elektronik Ekipmanlardan Değerli Metallerin Geri Kazanımı İçin En İyi Yönetim Teknolojisinin Seçimi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul teknik Üniversitesi. https://polen.itu.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11527/13078/10047126.pdf?sequence=1&isAllowed=y adresinden alındı

Tanner, N. S. (2019). *TYK.* www.tyk.org.tr: http://www.tyk.org.tr/tr/images/pdf/At%C4%B1k_Sempozyumu_Sunum_Revize_3-4_Final_040319.pdf adresinden alındı

TÜBİSAD. (2016). *Yıllık Faaliyet Raporu.* İstanbul: TÜBİSAD Yetkilendirilmiş Kuruluşu.

Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., & Boni, H. (2005). *Global Perspectives on E-Waste.* Amsterdam: Enviromental İmpact Assesment Review.

Yazıcı, E. Y., & Deveci, H. (2009, Eylül). E-Atıklardan Metallerin Geri Kazanımı. *Madencilik, 48*(3), 3-18.

Yazıcı, E. Y., & Deveci, H. (2011). E-Atıkların Çevresel Etkileri ve İkinil Kaynak Olarak Ekonomik Potansiyeli. *Çevre Bilim ve Teknoloji, 3*(3), 3-18.

EKLER

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Pelin Onay
Doğum Yeri	Zonguldak
Doğum Tarihi	29.07.1989
Uyruğu	√ T.C. ❒ Diğer:
Telefon	05327673094
E-Posta Adresi	Pelin_karamanoglu@hotmail.com
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Çevre Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2010

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Çevre Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler

An economic analysis of the recovery of gold from CPU, boards, and connectors using aqua regia 29 June 2015

ABSTRACT

The recovery and recycling processes for the management of electronic wastes should be determined accurately. The processes applied to e-waste recycling are continually developing. These processes are applied using different methods, and thus, economic analysis is required in order to select the preferred choice. In particular, the aqua regia process for the recycling of gold can usually be implemented efficiently. In our study, the inputs and outcomes of the physical separation and chemical reactions that are conducted with the aqua regia for CPU, board, and connectors in the real scale plant were discussed. The rent, equipment, and labor costs, as an expense, have mainly been determined in the economic analysis of the aqua regia, and $16.55 is calculated as kg waste per month. However, the benefits obtained from CPU, board, and connectors were determined as $274, $104, and $94 for kg waste per month, respectively.

Keywords: Gold recovery; E-waste; Aqua regia; Economic analysis