T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BASKI DEVRE KARTLARINDAKİ DEMİR, BAKIR VE NİKEL METALLERİNİN GERİ KAZANIMINDA OPTİMUM LİÇ ŞARTLARININ BELİRLENMESİ

Cihan İLÇİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2012

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BASKI DEVRE KARTLARINDAKİ DEMİR, BAKIR VE NİKEL METALLERİNİN GERİ KAZANIMINDA OPTİMUM LİÇ ŞARTLARININ BELİRLENMESİ

Cihan İLÇİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

Yrd. Doç. Dr. Hatice İNAN

GEBZE

2012

YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 20/01/2012 tarih ve 2012-03 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 06/02/2012 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Cihan İLÇİN'in tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç.Dr. Hatice İNAN

ÜYE : Prof. Dr. Anatoli DİMOGLO

ÜYE : Doç.Dr.Osman Atilla ARIKAN

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……/……/20… tarih ve ……/…… sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: BASKI DEVRE KARTLARINDAKİ DEMİR, BAKIR VE NİKEL METALLERİNİN GERİ KAZANIMINDA OPTİMUM LİÇ ŞARTLARININ BELİRLENMESİ

YAZAR ADI: CİHAN İLÇİN

Gelişen teknoloji ile birlikte artan elektrikli ve elektronik cihazların fonksiyon ve tasarımlarımdaki değişiklikler nedeniyle, ortalama kullanım süreleri azalmaktadır. Bu durum son zamanlarda büyük miktarda elektronik atığın ortaya çıkmasına neden olurken ciddi bir çevre sorunu haline gelmiştir. Elektronik atıkların çevresel zararlarının yanında, metal ve değerli metal içeriği, cevherlerle karşılaştırıldığında bu atıkların potansiyel bir ikincil kaynak oldukları ortaya çıkmaktadır.

Elektronik atıktan metallerin geri kazanımı amacıyla bugüne kadar 4 yöntem (fiziksel, hidrometalurjik, biyometalurjik ve pirometalurjik proses) uygulanmaktadır. Bu yöntemler içerisinden diğerlerine kıyasla çevresel kirliliği daha az ve düşük maliyette uygulanabilen hidrometalurjik yöntem ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada optimum partikül çapı, zaman ve katı sıvı oranını bulmak için yanıt yüzey metodu kullanılmıştır. Baskı devre kartları önce öğütme ve eleme işlemine tabi tutulduktan sonra Yanıt Yüzey Metodunda belirlenen deney tasarımındaki şartlarda kral suyu ile liç edilmiştir. Liç çözeltisindeki geri kazanılmış metaller ICP-OES cihazında ölçülmüş ve optimum katı/sıvı, partikül çapı ve zaman değişkenleri bakır, nikel ve demir metali için incelenmiştir. Baskı devre kartın liç işleminde en etkili parametrenin partikül çapı olduğu gözlenmiştir. Partikül çapı için 0,5-1 mm'nin optimum aralık olduğu ve bakır, demir, nikel metalin bu aralıklarda yüksek çözünme verimine ulaştığı tespit edilmiştir. Partikül çapı dışında incelenen zaman ve katı/sıvı oranın çözünme verimleri kıyaslandığında her bir metal için değişkenlik göstermiştir.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS: THE DETERMINATION OF OPTIMUM LEACHING CONDITIONS FOR RECOVERING OF IRON, COPPER AND NICKEL METALS IN PRINTED CIRCUIT BOARDS

AUTHOR: CİHAN İLÇİN

With the development of electrical and electronic equipments, their average life spans have reduced due to the changes in their functions and their designs. This situation recently has caused to happen a large amount of electronic waste. However, It has become a serious enviromental problem. Despite the environmental hazards of electronic wastes, when compared with their metal and precious metal contents with the other ores, these wastes are seen as the potential of secondary source.

Four methods (physical, hydrometallurgical and pyrometallurgical processes) have been applied for recovery of metals from electronic wastes up to today. In comparison with the other methods, the hydrometallurgical method is cost lower. In addition, It is caused to occur less enviromental pollution than the others.

In this study, the optimum recovery of iron, nickel and copper from PCB was investigated by response surface method. After PCB was subjected to grinding and sieving, PCB samples were leached with aqua regia. The recovered metals in the leaching solutions were analyzed with ICP-OES and response surface method was used to find optimum particle diameter, time and solid/liquid ratio.

As a result of this experiment, in the leaching process of PCB the most effective parameter was identified as particle diameter. According to this parameter, The optimum particle diameter is between 0,5-1mm. Copper, iron, nickel and metal reached efficiency between these diameters. Time and solid / liquid ratio was examined outside of the particle diameter when the efficieny of leaching compared and it showed varies for each metal.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda her türlü desteğini benden esirgemeyen ve değerli zamanını bana ayıran danışman hocam Çevre Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Hatice İNAN' a

Çalışmam sırasında bilgileri ile beni aydınlatan Çevre Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Anatoli DİMOGLO' ye,

Laboratuvar çalışmalarım boyunca bana zaman ayıran ve yardımlarını esirgemeyen Çevre Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Dr. Serdar KARA' ya,

Yüksek lisans tez çalışmamda Yanıt Yüzey Yönteminin yürütülmesindeki katkılarından dolayı TUBİTAK MAM Çevre Enstitüsü'nde Uzman Araştırmacılarından Dr. Mehmet ÜNSAL' a

Laboratuvar çalışmalarımın analiz aşamasında bana zaman ayıran ve yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. M. Salim ÖNCEL' e

Hayatımın her aşamasında ve her alanında her türlü destekleriyle ve varlıklarıyla hayatıma anlam kazandıran çok sevgili aileme ve özellikle eğitimim hayatım boyunca bana desteğini eksik etmeyen ve beni sürekli öğrenmeye teşvik eden anneannem Esma KIZILDAĞ'a

En içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

SAYFA

ÖZET iv
SUMMARY v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ x
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
ÇİZELGELER DİZİNİ xvi

1. GİRİŞ 1
   1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi 1
   1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsam 4
2. ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK ATIK YÖNETİMİ 5
   2.1. Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlar 5
   2.2. Elektrikli ve Elektronik Ekipmanların Materyal Bileşimleri 6
   2.3. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Hayat Döngüsü 15
   2.4. Uluslar Arası Yasal Düzenlemeler 17
      2.4.1. Basel Sözleşmesi 17
      2.4.2. WEEE ve RoHS Direktifleri 18
      2.4.3. WEEE Direktifi 19
      2.4.4. RoHS Direktifi 20
   2.5. Avrupa'da Elektrikli ve Elektronik Atık Yönetimi 21
   2.6. Türkiye'de Atık Yönetiminin Tarihsel Süreci ve Elektriklive Elektronik Atık Yönetimi 25
   2.7. Elektrikli ve Elektronik Atıkların Tehlikeli Özellikleri 29
      2.7.1. Zararlı Maddeler ve Bileşenleri 29
      2.7.2. Elektrikli ve Elektronik Atık İçeresindeki Ağır Metallerin İnsan Sağlığına Etkileri 38

3. ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK ATIKLARIN GERİ KAZANIM YÖNTEMLERİ 39
3.1. Elektrikli ve Elektronik Atıkların Fiziksel Özellikleri 40
3.1.1. Manyetik, Yoğunluk ve Elektrik İletkenliği Özellikleri 40
3.1.2. Partikül Boyutu Özellikleri 42
3.2. Ön Hazırlık İşlemleri 42
3.3. Fiziksel Yöntemler 44
3.3.1. Boyut Küçültme 45
3.3.2. Boyut Farkına Göre Ayırma 46
3.3.2.1. Eleme 46
3.3.2.2. Sınıflandırma 46
3.3.3. Özgül Ağırlık Farkına Göre Ayırma 47
3.3.4. Manyetik Ayırma 47
3.3.5. Elektrik İletkenliği Farkına Göre Ayırma 47
3.3.5.1. Elektrostatik Ayırma 47
3.3.5.2. Girdap Akımı Ayırma 48
3.3.5.3. Triboelektrik Ayırma 48
3.4. Hidrometalurjik ve Biyohidrometalurjik Yöntemler 50
3.4.1. Liç Prosesi 50
3.5. Pirometalurjik Yöntemler 51
3.6. Türkiye'de Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya İşleme Tesisleri 54
3.6.1. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya İşleme Tesisleri 54
4. YANIT YÜZEY METODOLOJİSİ 56
4.1. Yanıt Yüzey Modelin Oluşturulması 57
4.2. Model Parametrelerin Tahminlenmesi 59
4.3. Model Uygunluğun Test Edilmesi 59
4.4. Model Uygunsuzluğu Testi 60
4.5. Optimizasyon 60
4.6. İstenilen Hedefe Ulaşma Fonksiyonu Yaklaşımı 62
4.7. Yanıt Yüzey Yöntemlerinin Hidrometalurjideki Yeri 63
5. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI 64
6. MATERYAL VE METOD 67
6.1. Kullanılan Materyal ve Cihazlar 67
6.2. Metot 68

7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR 72
7.1. Baskılı Devre Kartlarındaki Demir, Bakır ve Nikel'in Liç İşlemi İle Çözülmesinin optimizasyonu 72
7.2. Deneysel Tasarım 72
7.3. Baskı Devre Kartlarındaki Demir'in Liç İşlemi İle Çözülmesinin Optimizasyonu 73
7.3.1. Farklı Reaksiyon Koşullarında Baskı Devre Kartlarındaki Demir Elementinin Ekstraksiyonunun İstatiksel Açıdan Değerlendirilmesi 75
7.3.2. Demir Miktarının Yanıt Yüzey ve İz Düşüm Grafiklerinde Yorumlanması 78
7.4. Baskı Devre Kartlarındaki Bakır'ın Liç İşlemi İle Çözülmesinin Optimizasyonu 82
7.4.1. Farklı Reaksiyon Koşullarında Baskı Devre Kartlarındaki Bakır Elementinin Ekstraksiyonunun İstatiksel Açıdan Değerlendirilmesi 84
7.4.2. Bakır Miktarının Yanıt Yüzey ve İz Düşüm Grafiklerinde Yorumlanması 87
7.5. Baskı Devre Kartlarındaki Nikel'in Liç İşlemi İle Çözülmesinin Optimizasyonu 92
7.5.1. Farklı Reaksiyon Koşullarında Baskı Devre Kartlarındaki Nikel Elementinin Ekstraksiyonunun İstatiksel Açıdan Değerlendirilmesi 94
7.5.2. Nikel Miktarının Yanıt Yüzey ve İz Düşüm Grafiklerinde Yorumlanması 97
7.6. Optimum Değer Aralıkların Yakma ve Filtre Prosesleri İle Doğrulanması 101
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 104
KAYNAKLAR 108
ÖZGEÇMİŞ 113

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	Açıklama
AB	Avrupa Birliği
AEEE	Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar
AYGE	Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik
APME	The Association of Plastics Manufactures in Europe
BAG	Bromlu Alev Geciktiriciler
CFC	KloroFloroKarbon
CRT	Katot Işınlı Tüp
ÇOB	Çevre ve Orman Bakanlığı
E-Atık	Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atığı
EEE	Elektrikli ve Elektronik Ekipman
EPA	Çevre Koruma Ajansı
HCFC	Hidrofloroklorokarbon
HFC	Hidroflorokarbon
ICER	Elektronik Ekipman Geri Dönüşüm Sanayicileri Birliği
ICSG	Uluslararası Bakır Çalışmaları Grubu
LCD	Sıvı Kristalli Ekran
PCB	Poliklorlanmış Bifenil
RoHS	Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances (Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılması)
TAKY	Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
WEEE	Waste electrical and electronic equipment (Elektrikli ve elektronik ekipman atığı)

℃	Santigrad derece
g	Gram
t	Ton
cm^2	Santimetrekare
mm	Milimetre
m	Metre
Kg	Kilogram
Ω	Ohm $\left(\frac{\text{volt}}{\text{amper}}\right)$
Kwh	Kilowatt saat
ml	Mililitre
O_3	Ozon
m^3	Metreküp

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
2.1. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya İçeriği	8
2.2. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Hayat Döngüsü	15
2.3. AEEE'lerin Üretimden Hammaddeye Hayat Döngüsü	16
2.4. AB Ülkelerinde Piyasaya Sürülen EEE Miktarı (kişi başı / kg)	21
2.5. AB Ülkelerinde Yıllık AEEE Toplama Miktarı (Kişi başı / Kg)	22
2.6. Avrupada Piyasaya Sürülen EEE Miktarı (2008)	23
2.7. Avrupada Toplanan AEEE Miktarı (2008)	24
2.8. Türkiyede İllere Göre Oluşan Elektronik Atık Miktarları	27
2.9. Türkiye Populasyon Oranları	28
2.10. Türkiye Atık - Populasyon Oranı	28
2.11. Bromlu Alev Geciktirici türleri	34
3.1. Partikül Boyut Aralığı – Dağılım Grafiği	42
3.2. Elektrikli ve Elektronik Ekipmanların Fiziksel Ayıştırılması	44
3.3. Elektrikli ve Elektronik Atık Ayrıştırma Tesis Bileşenlerinin Üsten Ve Yandan Gösterimi	55
4.1. Üç faktörlü bir sistem için merkezcil bileşik deney dizaynı	57
4.2. (a) Maksimum nokta için yanıt yüzey grafiği ve izohips eğrileri	61
(b) Minimum nokta için yanıt yüzey grafiği ve izohips eğrileri	61
(c) Eyer noktası için yanıt yüzey grafiği ve izohips eğrileri	62
6.1. Atık baskı devre kartı	67
6.2. Kırıcı ünitesi	69

6.3. Elek sistemi ile oluşturulan fraksiyonlar 69

7.1. Deneysel Olarak Elde Edilen demir (mg) Değerlerine Karşılık Model Fonksiyonlardan Elde Edilen Demir (mg) Değerleri Arasındaki İlişki 78

7.2. (a) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Demir (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve zaman iz düşüm grafiği 79

7.2. (b) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Demir (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve zaman ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği 79

7.3. (a) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Demir (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve partikül boyutu ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği 80

7.3. (b) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Demir (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve partikül boyutu ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği 80

7.4. (a) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Demir (mg) miktarının, zaman ve partikül boyutu ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği 81

7.4. (b) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Demir (mg) miktarının, zaman ve partikül boyutu ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği 81

7.5. Deneysel Olarak Elde Edilen Bakır (mg) Değerlerine Karşılık Model Fonksiyonlardan Elde Edilen Bakır (mg) Değerleri Arasındaki İlişki 87

7.6. (a) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Bakır (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve zaman iz düşüm grafiği 88

7.6. (b) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Bakır (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve zaman ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği 88

7.7. (a) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Bakır (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve partikül boyutu ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği 89

7.7. (b) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Bakır (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve partikül boyutu ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği 89

7.8. (a) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Bakır (mg) miktarının, zaman ve partikül boyutu ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği 91

7.8. (b) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Bakır (mg) miktarının, zaman ve partikül boyutu ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği 81

7.9. Deneysel Olarak Elde Edilen Nikel (mg) Değerlerine Karşılık Model Fonksiyonlardan Elde Edilen Nikel (mg) Değerleri Arasındaki İlişki 97

7.10. (a) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Nikel (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve zaman iz düşüm grafiği 98

7.10. (b) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Nikel (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve zaman ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği 98

7.11. (a) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Nikel (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve partikül boyutu ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği 99

7.11. (b) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Nikel (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve partikül boyutu ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği 99

7.12. (a) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Nikel (mg) miktarının, zaman ve partikül boyutu ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği 100

7.12. (b) Baskı devre kartlarının ekstraksyonu sonucu elde edilen Nikel (mg) miktarının, zaman ve partikül boyutu ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği 101

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

2.1. Elektrikli ve elektronik eşya içerisindeki materyal içeriklerinin farklı kuruluşlardan alınan verileri 9
2.2. Elektrikli ve elektronik eşya kategorilerine göre materyal içerikleri 9
2.3. Baskılı Devre Kartların Element Analizi içerikle 11
2.4. Dünyadaki değerli metal rezervleri ve elektronik atık kategorilerindeki kullanım miktarlar 13
2.5. Cep telefonları, Kişisel ve dizüstü bilgisayarların değerli metal içeriği 14
2.6. Hurda malzeme kullanımının yararları 14
2.7. Elektrikli ve elektronik eşyalarda bazı zararlı maddelerin sınırlandırılması yönetmeliğindeki tehlikeli maddeler ve kotaları 21
2.8. Türkiyede yönetim şekillerine göre yerleşim yeri nüfusları 28
2.9. 100μF - 10V alüminyum kapasitör içeriği 31
3.1. Bakır Alaşımlarının Manyetik Duyarlılık 41
3.2. Metallerin Bazı Fiziksel Karakteristikleri 41
3.3. Materyal Özellikleri ve Fiziksel Ayırma Yöntemleri 45
3.4. Elektik ve Manyetik özelliklerinden faydalanan ayırma yöntemleri 49
3.5. E-atıklardan Metallerin Geri kazanımı için uygulanabilecek yöntemlerin karşılaştırılması 53
6.1. Yanıt yüzey metod için tanımlanan değişken kodları 69
6.2. Metal optimizasyonu için yüzey merkezcil deney tasarımı 70
7.1.Yüzey merkezcil deney tasarımında kullanılan bağımsız değişkenler için kodlanan seviyeler ve bu kodlara karşılık gelen değerler 73
7.2. Demir ektraksiyon optimizasyonu yüzey merkezcil deney tasarım 74
7.3. Demir ekstraksiyonunun optimizasyonu için bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiye bağlı olarak lineer ve kuadratik modellerde etkilerin tahminleri ve katsayıları 76
7.4. Demir ekstraksiyonu optimizasyonu için bağımsız değişkenlerin minimum, maksimum ve optimum değerleri 77
7.5. Bakır ektraksiyon optimizasyonu yüzey merkezcil deney tasarım 83

7.6. Bakır ekstraksiyonunun optimizasyonu için bağımsız değişkenler ile Bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiye bağlı olarak lineer ve kuadratik modellerde etkilerin tahminleri ve katsayıları 85
7.7. Bakır ekstraksiyonu optimizasyonu için bağımsız değişkenlerin minimum, maksimum ve optimum değerleri 86
7.8. Nikel ektraksiyon optimizasyonu yüzey merkezcil deney tasarım 93
7.9. Nikel ekstraksiyonunun optimizasyonu için bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiye bağlı olarak lineer ve kuadratik modellerde etkilerin tahminleri ve katsayıları 95
7.10. Nikel ekstraksiyonu optimizasyonu için bağımsız değişkenlerin minimum, maksimum ve optimum değerleri 96
7.11. Liç işlemi sonundaki filtre kağıdında biriken madde miktarı 102
7.12. Yakma işlemi sonundaki krozede kalan madde miktarı 103

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi

21. yüzyıl dünyasında iklim değişikliği ve çevre olgusu, sadece ekolojik olaylardan ibaret değildir. Bu iki olgu aynı zamanda, ülke ekonomisini, enerji ve sanayi yatırımlarını, sosyal hayatı ve toplumsal hukuku etkileyen ve bütünsel bir yaşam döngüsünde ele alınması gereken konulardır. Günümüzde insanlar, toplumlar, daha temiz ve daha yeşil bir dünyada yaşamak istemektedirler. Gelişmiş ülkelerde yaşayan insanlar gibi ülkemizde de insanlar artık çevreci yaklaşımları daha fazla önemsiyor ve daha yaşanabilir bir dünya özlemi giderek toplumsal baskıya dönüşüyor. Bu noktada, çevrenin korunması ve bunu etkileyen konuların önemi ortaya çıkmaktadır. Dünya nüfusunun 2015 yılına kadar 7,2 milyara ulaşacağı ve hızlı kentleşme sonucu 2025 yılına kadar kentlerde yaşayan insan sayısının da bugünküne nazaran 2-3 katına ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu hızlı nüfus artışının hava ve su kirliliği ile katı atık oluşumu gibi birçok çevresel soruna neden olmaktadır.

Atıkların yönetimi konusunda yapılan çalışmalarda atıkların toplanması, taşınması ve bertarafı ekonomik anlamda büyük yüktür. Toplum sağlığı açısından önemli olduğu kadar, uygun şekilde değerlendirilemediği takdirde kaybolan ekonomik bir değer olan katı atıkların yönetiminde, toplanmasından bertarafına kadarki süreçte gerçekleştirilecek tüm hizmetlerin maliyet ve sorumluluğu yerel yönetimler ve üreticilere düşmektedir. Bu yaklaşımın temelinde, ülkemizde ve Dünya'da oluşan atıkların yönetimiyle ilgili değerlendirmeler sonucundaki eksik ve hataların giderilmesi gerekmektedir.

Dünya üzerinde özellikle gelişmiş ülkelerden gelişmekte olan ülkelere önemli ölçüde atık elektrikli ve elektronik eşya ihraç edildiği bilinmektedir. Sivil toplum kuruluşları ve kamuoyu baskısı ile gelişmiş ülkeler, miktarları sürekli artan atık elektrikli ve elektronik eşyalar için atık yönetim sistemleri kurmaya başlamışlardır. Oluşturulan yönetim sistemleri içinde genişletilmiş üretici sorumluluğu önemli stratejik bir rol oynamaktadır [Uğur Metal, 2011]. Türkiye'de insan ve çevre sağlığının korunması ile başlayan ve Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrol

Yönetmeliği taslağına kadar uzanan süreçte atık yönetimi çalışmaları hızla devam etmektedir. Atık yönetiminin temel amacı olan ürünlerden maksimum düzeyde yarar sağlamak ve mümkün olduğu kadar az miktarda atık üretmek için özel ve yerel yönetimler ile çalışmalar sürdürülmektedir. Katı atık yönetimi içerisinde yer alan ve gelişen teknoloji ile birlikte artan bir ivme gösteren elektrikli ve elektronik atıkların, ülkemizde de toplanması, taşınması, sınıflandırılması, geri kazanım ve bertaraf faaliyetleri, oluşturulan genelge ve tebliğler ile belirli bir standartta yürütülmektedir.

Elektrikli ve elektronik atıklar, 2003 yılında yürürlüğe giren ve üretici, tüketici, yerel yönetim ve toplama-işleme tesislerini kapsayan döngü içerisinde çevresel sorumluların belirlendiği WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) ve RoHS (Restriction of The Use of Certain Hazardous Substances) direktifi, Avrupa'da elektronik atık tanımının ve standardının oluşturulmasında somut bir adımdır. Bu adım ülkemizde elektrikli ve elektronik eşyalarda bazı zararlı maddelerin kullanımının sınırlandırılmasına dair yönetmelik ile sürecin üretici ayağındaki standartlar ile başlatılmıştır.

Elektronik atıklar, kullanım ömrü dolan veya diğer nedenlerle atıl duruma gelen elektrikli ve elektronik ürünlerin (bilgisayar, televizyon, baskılı devre kartları vb.) ürün sahipleri tarafından atığa ayrılması diye tanımlanır [Yazıcı ve Deveci, 2009]. Atığa ayrılan elektrikli elektronik cihazların oluşturduğu atıklar bulundurduğu temel metaller ve değerli metaller ile son derece stratejik atıklardır. Aslında atık değil, hepsi birer doğal değerdir, bu yüzden elektronik atıklara artık stratejik malzeme olarak bakılması şarttır. Ülkemizde üretilen ve yurt dışından ithal edilen elektronik cihazların içerisindeki metallerin kazanımı ülkemizdeki değerli metal rezervleri ile kıyaslandığında önem taşımaktadır.

Elektronik atıkların değerlendirilmesi sonucunda enerji kazanımı, hammadde kullanımının azaltılması sağlanmaktadır. Ayrıca kullanım ömrü dolan elektronik eşyaların önemli bir bölümünde çevreye zararlı etkisi olan brom içeren yanmayı geciktiriciler, asbest, seramik lifler ve inorganik (cıva, kurşun, kadmiyum vb.) maddeler, [Robinson, 2009] kurşun içeren katot ışın tüpü camları, [Doğan, 2009] soğutucular ve buzdolaplarında kullanılan kloroflorokarbon gazı kirleticilerini içermektedir [Qin, 2007]. Kontrolsüz ve uygun olmayan geri dönüşüm faaliyetleri

nedeniyle çevrenin ve insanların ağır metal gibi kirleticilerin etkisi altında kaldığı çeşitli çalışmalarda ortaya konulmaktadır [Filiz, 2007]. Tehlikeli madde özellikleri nedeni ile insan sağlığı ve çevreye zararlı etkisi olan organik ve inorganik maddelerin geri kazanım ve bertaraf tesislerinde uzaklaştırılması gerekmektedir.

Ülkemizde oluşan elektrikli ve elektronik atıkların içerdikleri değerli metaller ve tehlikeli maddeler göz önüne alınarak geri dönüşüm çalışmaları yürütülmektedir. 2010 yılında ortalama 539.000 ton oluşan elektronik atığın 10.000 tonu işleme tesislerinde toplanması geriye kalan istatistiklere yansımayan kısmın ekonomiye ve çevreye zararını açıkça göstermektedir [Sayman, 2011]. Ülkemizde en büyük sorun yönetmelik öncesi üreticinin yeterli yaptırım gücüne sahip olmamasından dolayı büyük bir oranda hurdacılar ile çalışılması ve bu konuda yeterli projelerin üretilmemesidir. Ayrıca hurdacı ve lisanslı firma arasındaki fiyat/maliyet sorunu ve üreticilerin bu konuda yeterli bilgi ve tecrübe sahibi olmamasından da kaynaklanmaktadır. Bu konuda tüketiciye yönelik uygulanabilir projeler üretilmemesinden kaynaklanan yetersiz toplama noktaları ve kullanım ömrü dolan malzemelerin yenileri ile değiştirilmesi konusunda teşvik edilmemesi ülkemizde elektronik atık yönetiminde büyük sorunlara sebep olmaktadır.

Dünyada yaygın olarak kullanılan ve elektronik atıkların geri kazanımındaki dört yöntemden biri olan fiziksel yöntemler, elektronik atıkların işleme tesislerinde hidrometalurjik ve pirometalurjik tesislere gönderilmeden önce ön işlem prosesi olarak, elle söküm veya elektrikli ve elektronik makine ayrıştırma hattı yardımı ile uygun boyut ve saflıkta malzemeyi hazırlanmasını sağlarlar. Günümüzde hidrometalurjik yöntemlerde ise baskı devre kartların içerisindeki azalan değerli metallerin optimum verimde geri kazanılması araştırmalarına devam edilmektedir. Hidrometalurjik ve fiziksel yönteme göre yüksek maliyetli, çevresel kirliliğe sebep olan pirometalurjik yöntemler, metallerin geri kazanımı sağlayan geleneksel yöntemdir. Dünyada elektrikli ve elektronik atıkların yüksek verimle geri kazanılması için uygulanan fiziksel, hidrometalurjik, biyohidrometalurjik, pirometalurjik yöntemler, gelişen teknoloji ve değişen metal kullanım miktarları doğrultusunda birlikte veya farklı yöntemler ile modifiye edilerek geliştirme çabaları devam etmektedir [Yazıcı ve Deveci, 2009].

Ülkemizde elektrikli ve elektronik atıkların değerlendirilmesi, Çevre ve Şehircilik Bakanlığından uygunluk belgesine sahip fiziksel işlem yapan firmalar tarafından yürütülmektedir [AYDB].

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Günümüzde gelişen teknoloji ile beraber elektrikli ve elektronik cihaz üretiminde kullanılan değerli metal miktarının giderek düşmesi yanında artan elektrikli ve elektronik atık miktarının geri kazanılması için düşük maliyetli yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda değerli metal ve temel metallerin düşük maliyet ve yüksek verimde geri kazanılması için geleneksel pirometalurjik yöntemler yerine günümüzde hidrometalurjik yöntemler araştırılmaktadır. Değerli metallerin yüksek oranda bulunduğu elektrikli ve elektronik atık içerisindeki baskı devre kartların, ekonomik potansiyelinin en verimli şekilde kullanılmasını amaçlayan bu çalışmada, pirometalurjik yöntemdeki yüksek maliyete karşın daha düşük maliyetli fiziksel ve hidrometalurjik yöntemlerin bir arada kullanılmasının avantajlarından faydalanılmıştır. Heterojen yapıya sahip baskı devre kartlarındaki bağımsız değişkenler için daha az sayıda ve daha verimli esas deneme yapılmasına olanak sağlayan yanıt yüzey metodolojisinden yararlanılarak, hidroklorik asit ile nitrik asitin 3:1 oranına göre karıştırılmasıyla oluşturulan çözeltide, baskı devre kartların içerisindeki demir, bakır ve nikel'in çözünmesi incelenmiştir.

2. ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK ATIK YÖNETİMİ

2.1. Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlar

Son yıllarda, elektrikli ve elektronik ekipman üretimi hızlı büyüyen ve önemli ölçüde artış gösteren iş kollarından biridir [Yang et al 2011]. Bunun yanında gelişen teknoloji insanların elektronik cihaz ürünlerini kullanma ömrünü azaltmaktadır. Kullanım ömrü dolan veya diğer nedenlerle atıl duruma gelen elektrikli ve elektronik ürünler (bilgisayar, televizyon, baskılı devre kartları vb.) ürün sahipleri tarafından atığa ayrılmaktadır. Atığa ayrılan elektrikli ve elektronik cihazların oluşturduğu atıkları kısaca E-atık (Elektronik Atık) ya da ingilizce tanımıyla WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) olarak ifade edilmektedir [Yazıcı ve Deveci, 2009]. Elektronik atık Avrupa da yayınlanan WEEE direktifi ile 10 kategori ve onun alt kategorilerinden oluşmaktadır.

- Büyük ev eşyaları (buzdolabı, çamaşır makinesi, bulaşık makinesi vb)
- Küçük ev aletleri (elektrik süpürgesi, tost makinesi vb.)
- Bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları (Kişisel bilgisayar ekipmanları ve telefonlar vb.)
- Tüketici ekipmanları (video kamera, müzik enstrümanları vb.)
- Aydınlatma ekipmanları (flüoresan lamba ve ampuller vb.)
- Elektrikli ve elektronik aletler (matkap ve testereler vb.)
- Oyuncaklar, eğlence ve spor aletleri (Video oyunları, jetonlu makineler vb.)
- Tıbbi cihazlar (diyaliz ve analiz ekipmanları vb.)
- İzleme ve kontrol aletleri (termostatlar ve ısı ayarlayıcıları vb.)
- Otomatlar (para ve içecek otomatları vb.) [Directive, 2002]

E-atıklar diğer belediye ve endüstriyel atıklardan farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerden oluşmaktadır. E-atıkların önemli bir bölümü değerli metal içerdiği gibi çevreye zararlı etkisi olan organik (Bromlu alev geciktiriciler, asbest, seramik lifler) ve inorganik (Cıva, Kurşun, Fosfor, Kadmiyum vb.) maddeler içermektedir [Robinson, 2009]. Organik ve inorganik maddelerden dolayı elektronik atıkların, evsel atıklarla birlikte atık sahalarında depolanması veya yakılması, çevresel sorunlara sebep olmaktadır. E- atıkların kırılması, parçalanması sonucu içindeki bazı ağır metaller (Cıva, Kurşun, Fosfor, Kadmiyum) yağmur vb. doğal süreçlerle çözünerek toprağa veya yerüstü /yer altı sularına sızmaktadır. Ayrıca, E-Atıkların içerdiği çeşitli organik maddeler (bromlu alev geciktirici, asbest, seramik lifler) baskı devre kartlarından metallerin geri kazanılması amacıyla yanması sonucu zararlı gazlar (dioksinler ve furanlar) açığa çıkmaktadır. E-atıkların çevresel kirlenme ve insan sağlığına etkilerini sakınmak amacıyla geri dönüşüm metotları ve ihtiyaç duyulan ana ve değerli metallerin geri kazanımı için özel işleme uygulamaları gerekmektedir [Yazıcı ve Deveci, 2009]. İşleme tesislerinde toplanan E-atıklar değerli metal, temel metal, diğer ürünler ve tehlikeli madde içeren maddeler birbirinden ayrılarak sınıflandırılır.

2.2. Elektrikli ve Elektronik Ekipmanların Materyal Bileşenleri

Elektrikli ve elektronik ekipman atıkları homojen olmamakla beraber aynı zamanda materyaller ve bileşenler bakımından da karmaşık bir yapıya sahiptir. Uygun maliyetli ve çevre dostu bir geri dönüşüm sistemi geliştirmek için bu atıkların içerdiği değerli materyallerin ve zararlı maddelerin tanımlanması, saptaması ve dahası bu atıkların fiziksel özelliklerinin anlaşılması önemlidir [Zhang and Forssberg, 1997]. Elektronik atıkların geri dönüştürülmesinde temel etken değerli metallerin geri kazanımıdır. E-atık özelliklerine göre beş ana grupta sınıflandırma yapılır.

Değerli metaller; Altın, gümüş, paladyum daha az genişlikte platinyum ve rutenyum

Ana ve özel metaller; Demir, bakır, alüminyum, nikel, kalay, kobalt, selenyum, indiyum, galyum

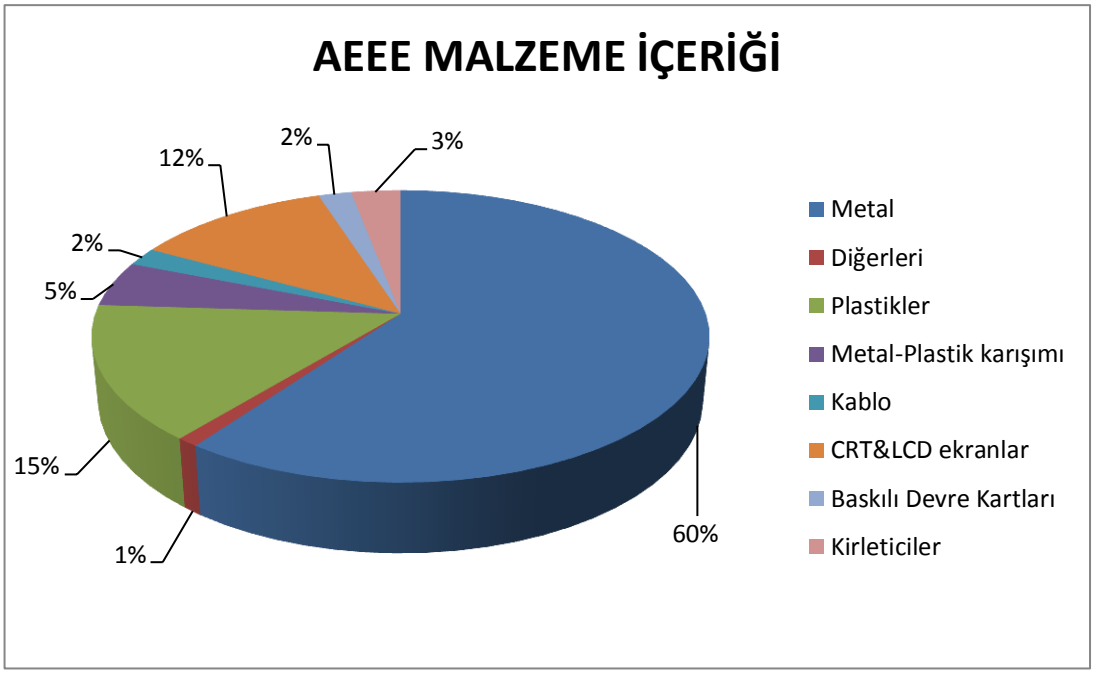
Zararlı metaller; Cıva, berilyum, kurşun, kadmiyum, arsenik, antimon

Halojenler; Brom, flor, klor

Diğer maddeler; Organikler; plastik, akışkan, cam, seramik [Hagelüken and Corti, 2009].

Atık elektrikli ve elektronik eşya (AEEE) materyalleri birçok çalışmada 5 kategoride incelenir. Metal, metal olmayan, cam, plastik ve diğer metal olarak sınıflandırılır. Demir ve çelik çoğunlukla Elektrikli ve Elektronik eşya içinde bulunan ve AEEE toplam ağırlığının yarısı olarak hesaplanır. Plastik 2. en geniş bileşen ağırlık olarak % 21 oranında AEEE' de bulunur. Demir dışı metaller AEEE toplam ağırlığın %13'ünü oluşturur. Bakır bu oranın %7'sidir [Widmer et al, 2005].

Atık elektrikli ve elektronik eşya içerisindeki % 60 civarındaki metaller komposizyonda geniş bir yer oluşturur [Ongonda et al, 2010]. Komposizyonda % 2 civarında bulunan baskılı devre kartları içerisindeki değerli metaller %60 civarındaki temel metaller ile birlikte geri kazanımın ana hedeflerini belirler. Dünyadaki metal ve değerli metallerin önemli kısmını oluşturan E-atıkların geri kazanımında üretici, tüketici, toplayıcı, işleme ve geri kazanım tesisleri etkin rol oynamaktadır.



Şekil 2.1. Atık elektrikli ve elektronik eşya içeriği [Ongonda et al,2010]

Herhangi bir elektrikli elektronik ekipman için oluşacak yıllık atık miktarı global olarak;

W = M x N / L ifadesi ile kabaca hesaplanabilir

- Ekipmanın ağırlığı (kg) =M
- Hizmette (piyasada) olan ekipman sayısı = N
- Ekipman için ortalama yaşam ömrü(yıl) = L [Doğan, 2009]

Birleşmiş Milletler (BM) verilerine göre elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının %10'u televizyon, %10'u monitör, %15'i tüketici elektronik cihazları, %15'i bilgi ve iletişim ekipmanları, %20'si soğutucular ve %30'u diğer elektrikli ve elektronik ev gereçleri atıklarından kaynaklanmakla beraber elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının %30,2'sini plastikler, %30,2'sini refraktör oksitler, %20,1'ini bakır, %8,1'ini demir, %4'ünü kalay, %2'sini kurşun, %2'sini alüminyum ve %1,4'ünü diğer materyaller oluşturmaktadır. Avrupa Plastik İmalatçıları Birliği (APME - The Association of Plastics Manufactures in Europe), Uluslararası Bakır Çalışmaları Grubu (ICSG – International Copper Study Group) verilerine ve Almanya'da gerçekleştirilen materyal içeriği analizlerine göre Batı Avrupa'da ve Almanya'da elektrikli ve elektronik ekipmanlardaki yer alan materyaller Çizelge 2.1'

de verilmiştir. Genel olarak baskılı devre levhalarındaki bu oran %40 metal, %30 plastikler ve %30 seramikler şeklindedir. Elektronik Ekipman Geri Dönüşüm Sanayicileri Birliği (ICER – Industry Council For Electronic Equipment Recycling) verilerine göre Çizelge 2.2'de elektrikli ve elektronik ekipman türlerine göre materyal içeriği verilmiştir. Değerler arasındaki farklılıklar elektrikli ve elektronik ekipmanların kaynaklarına, materyal içeriklerinin üretim yılına ve ürünün özelliğine göre kaynaklanmaktadır.[Çığgın, 2006]

Çizelge 2.1. Elektrikli ve elektronik eşya içerisindeki materyal içeriklerinin farklı kuruluşlardan alınan verileri [Çığgın, 2006]

Materyal	APME(%)	ICSG(%)	Almanya(%)
Demir	38,00	48,00	47,00
Demir Dışı	28,00	15,00	9,50
Plastikler	19,00	20,00	20,00
Cam	4,00	5,00	8,50
Ağaç	1,00	3,00	-
Diğer	10,00	9,00	14,00

Çizelge 2.2. Elektrikli ve elektronik eşya kategorilerine göre materyal içerikleri [Çığgın, 2006]

Ekipman Kategorisi	Materyal Yüzdesi (%)				
	Demir	Demir Dışı	Cam	Plastik	Diğer
Büyük ev aletleri	61	7	3	9	21
Küçük ev aletleri	19	1	0	48	32
Bilişim Teknolojisi Cihazları	43	0	4	30	20
İletişim Cihazları	13	7	0	74	6
Kahverengi Eşya (Tv, Radyo ,vb)	11	2	35	31	22
Gaz akışkanlı lambalar	2	2	89	3	3

Çizelge 2.3'de verilen baskılı devre kartların element analizinde Elektronik atıklar içerisindeki temel ve değerli metal miktarları verilmiştir. Çizelge 2.3' de verilen % içerikleri baskı devre kartın kullanıldığı ekipman, cihazın üretim yılı ve analiz ölçümlerine göre farklılık gösterebilir. Baskılı devre kartlarında, cep telefonu devre kartları yüksek değerli metal oranına sahip iken kişisel bilgisayar ekipmanların baskı devre kartları daha az yoğunlukta değerli metale sahiptir.

Yapılan araştırmalarda her yıl elektrikli ve elektronik eşyalarda 300 ton üzerinde altın kullanılmaktadır. Kullanım ömrü biten elektronik ürünler önemli bir potansiyel altın kaynağıdır. Cep telefonlarında 300-350 g/t, bilgisayar içerisindeki baskılı devre kartlarında 200-250 g/t arasında altın konsantrasyonuna sahiptir [Hagelüken and Corti, 2009].

Bunun yanında gelişen teknoloji, üretim miktarının arttırması yanında değerli metal oranını azaltmaktadır. Analiz yöntemlerinde hedeflenen metal ve uygulanan yöntem de bu kartların içerisindeki bileşenlerin kazanılmasında etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Çizelge 2.3'de verilen paladyum, altın, gümüş, bakır oranları piyasaya sürülen elektronik ekipmanların atıl duruma düşmesi sonucu geri kazanımın önemini göstermektedir. Baskı devre kartlarında temel geri kazanım elementi altın % 0,1 içeriğe, paladyum % 0,005, gümüş %0,2 oranında içermektedir.

Çizelge 2.3. Baskılı Devre Kartların Element Analizi [Çığgın, 2006]

Materyal	**İçerik (%)**			
Silis (Si)	30,2	49,0	-	-
Plastikler	30,2	19,0	-	-
Brom (Br)	-	4,0	2,7	-
Demir (Fe)	8,1	6,0	10,8	5-10
Bakır (Cu)	20,1	7,0	3,7	10-20
Alüminyum (Al)	2,0	-	4,8	1
Kalay (Sn)	4,0	1,0	3,1	2
Nikel (Ni)	2,0	3,0	0,32	1-3
Kurşun (Pb)	2,0	-	-	1-5
Çinko (Zn)	1,0	2,0	1,45	0,3
Gümüş (Ag)	0,2	-	0,08	0,05-0,3
Altın (Au)	0,1	-	0,01	0,0003-0,001
Mangan (Mn)	-	-	2,15	-
Antimon (Sb)	-	-	0,45	-
Baryum (Ba)	-	-	0,36	-
Klor (Cl)	-	-	0,19	-
Sodyum (Na)	-	-	0,18	-
Krom (Cr)	-	-	0,16	-
Kadmiyum (Cd)	-	--	0,04	-
Tantal (Ta)	-	-	0,02	-
Paladyum (Pd)	0,005	-	-	0,004-0,003
Diğer	-	9,0	-	-

Çizelge 2.4'de Elektrikli ve elektronik eşya (EEE) üretimi için yıllık metal miktarının gereksinimi ve çeşitli EEE kategorilerindeki ürünlerde kullanılan değerli metal miktarların % ağırlıkları bulunmaktadır. AEEE'lerin geri kazanımı ile maden üretimi arasında yapılan karşılaştırmalarda 1 Kg demir elde etmek için 2 Kg AEEE işlenmesi yeterli iken maden kaynaklarında bu oran 200 Kg'a denk gelmektedir. Bunu bakır için oranlandığımızda 1Kg bakır elde etmek için 13 Kg AEEE-işleme yeterli bir oran iken 200 Kg maden kaynağının işlenmesi gibi bir oran vardır. AEEE işleme tesislerin en büyük gelir kaynağı altında bu rakam 1 Kg altın üretimi için 100 ton AEEE-işlenmesi gerekirken maden kaynağında bu rakamı elde etmek için 240.000 ton gibi çok yüksek bir oranda maden kaynağı gerekmektedir [Sayman, 2011].

Çizelge 2.4'de Dünyadaki Altın, Paladyum, Gümüş, Bakır rezervleri ve EEE için kullanılan metal miktarları belirtilip 47.000 ton Altın rezervin yıllık üretimi 2.500 ton civarında ve bu rakamın elektrikli ve elektronik eşyalarda kullanımı 300 ton civarındadır. EEE içerisinde %12 Oranında ihtiyaç duyulan altın her yıl teknolojik yenileme ve kullanım ömrü dolması ile birlikte ıskartaya ayrılmaktadır [Ongonda et al, 2010]. Değerli metallerin tekrar kazanılması yıllık üretimde oluşan kaybın önlenmesi ve maden üretimine kıyasla daha uygun maliyetlerde kazanılması ile dünya ekonomisine büyük kazanç sağlamaktadır.

Çizelge 2.4'de veriler ışığında değerli metaller (altın, paladyum ve gümüş) bilişim ve telekomünikasyon ve tüketici ekipman kategorileri olan 3 ve 4. Kategorilerde, diğer kategorilerdeki elektrikli ve elektronik cihazlara göre yoğunluk göstermektedir. Bu kategoriler stratejik malzeme sınıfında olup özel işlemlere tabi tutulurlar. Bu işlemler yüksek verimde başta altın olmak üzere diğer değerli metallerin geri kazanımı hedeflemektedir.

Çizelge 2.4. Dünyadaki değerli metal rezervleri ve elektronik atık kategorilerindeki kullanım miktarları [Ongonda et al, 2010]

SEMBOL	GÜMÜŞ Ag	ALTIN Au	BİZMUT Bi	KOBALT Co	BAKIR Cu	PALADYUM Pd	ANTİMON Sb	KALAY Sn
Dünya Maden Üretimi (t/yıl)	20,000	2500	5600	58,000	$15*10^6$	230	130,000	275,000
EEE İhtiyacı(t/yıl)	6000	300	900	11,000	$4,5*10^6$	33	65,000	90,000
Üretimin % olarak İhtiyacı	30	12	16	19	30	14	50	33
Dünya rezervleri ('000 t)	400	47	320	6600	540,000	-	2100	5600
AEEE Kategori ve Alt kategorilerindeki değerli ve temel metallerin ağırlık olarak miktarı (g)								
1A,10	0,008	0,0019	-	-	1736	0,001	0,045	25,5
1B	-	-	-	-	958	-	-	-
1C	0,0023	0,00068	-	0,23	956	0,0014	0,029	-
2,5A,8	0,00033	0,0001		0,18	484	0,0002	0,19	-
3A	0,48	0,079	0,048	0,27	159	0,03	0,19	-
4A	0,12	0,016	0,06	0,14	423	0,0029	0,24	-
6	0,001	0,00028	-	1,29	1075	0,00058	0,012	-
7	0,072	0,008	-	0,29	25,58	0,00059	-	-
3B	0,21	0,013	0,95	0,18	723	0,0048	3,02	0,81
4B	2,65	0,17	0,66	0,21	971	0,067	5,75	13
3C	0,52	0,2	-	-	310	0,041	0,16	0,53
4C	0,45	0,11	-	-	824	0,034	0,71	18,3
5B	0,00027	0,000025	-	-	2,76	0,000015	0,00074	0,11

Çizelge 2.5. Cep telefonları, Kişisel ve dizüstü bilgisayarların değerli metal içeriği [Hagelüken and Corti, 2009]

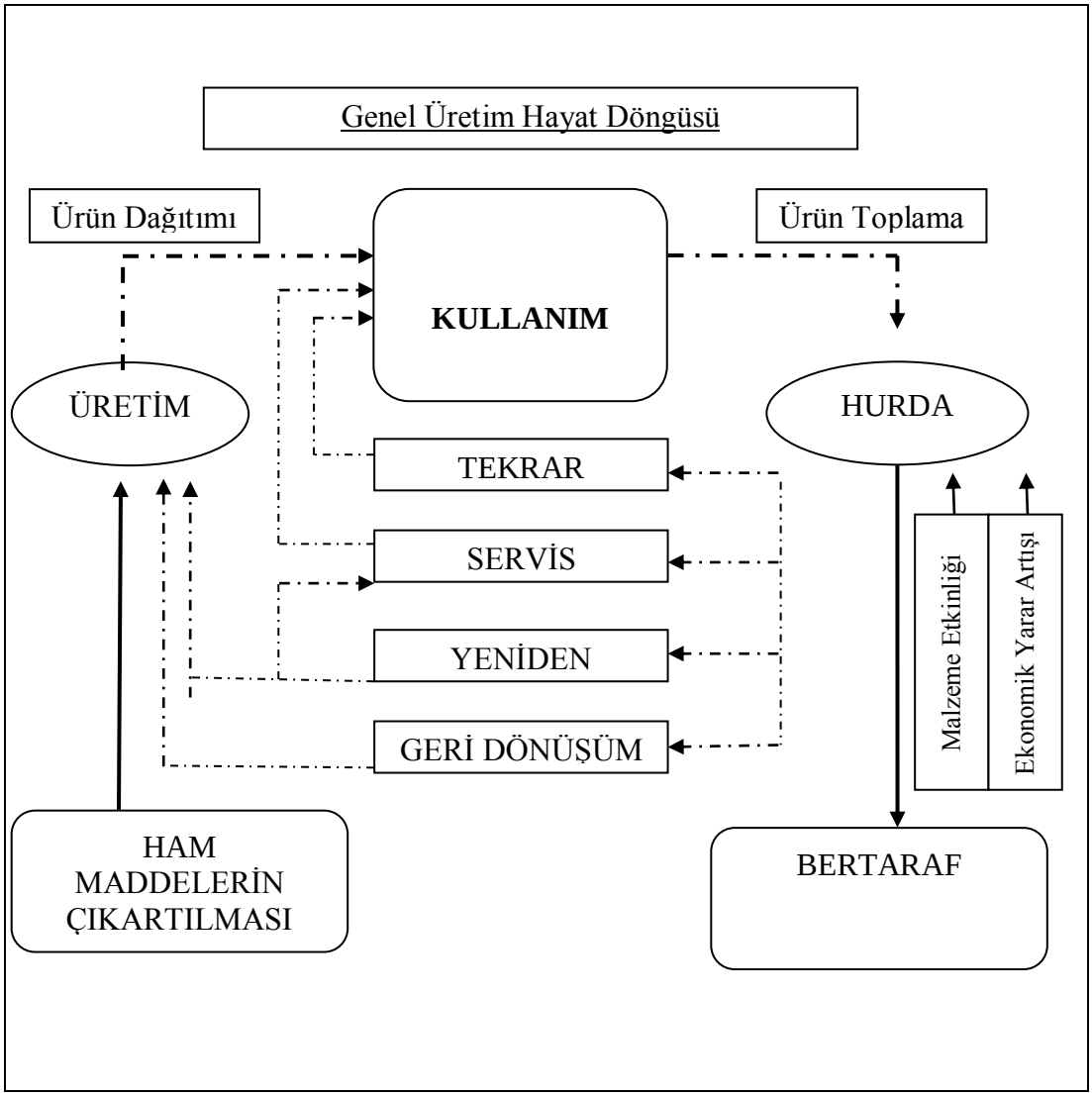
a)Cep Telefonları		**b)Kişisel ve Dizüstü bilgisayarlar**		**Dünya Maden Üretimi**	
1300 milyon tane		**300 milyon tane**			**a + b**
x250mg Ag	325 t Ag	x1000mg Ag	300 t Ag	Ag 21000t/yıl	%3
x 24mg Au	31 t Au	x 220mg Au	66 t Au	Au 2400t/yıl	%4
x 9mg Pd	12 t Pd	x 80mg Pd	24 t Pd	Pd 220t/yıl	%16
x9 g Cu	12000t Cu	x500 g Cu	15000t Cu	Cu 16Mt/yıl	<1%
1300 milyon pil		140 milyon laptop pil			
x3,8 g Co	4800 t Co	x65 g Co	8100 t Co	Co:60000t/yıl	%23
*Li-iyon tip		*Li-iyon tip			

Yukarıda belirtilen Çizelge 2.5'de EEE atıkları içindeki değerli metallerin maden oranları ile karşılaştırılması bulunmaktadır. Tabloda belirtilen cep telefonları ve bilgisayarlardaki gümüş, altın, paladyum, bakır ve kobalt oranları dünya ekonomisinde azımsanmayacak oranda mevcuttur. Çevre koruma ajansı (EPA) ham malzemeler yerine hurda demir ve çelik kullanımının 7 büyük yararını Çizelge 2.6'da belirtmiştir.

Çizelge 2.6. Hurda malzeme kullanımının yararları [Cui and Forssberg 2003]

FAYDALARI	**YÜZDE %**
Enerji kazanımı	74
Ham madde kullanımının azaltılması	90
Hava kirliliğin azaltılması	86
Su kullanımın azaltılması	40
Su kirliliğinin azaltılması	76
Maden atıkların azaltılması	97
Tüketim atıkların azaltılması	105

2.3. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Hayat Döngüsü

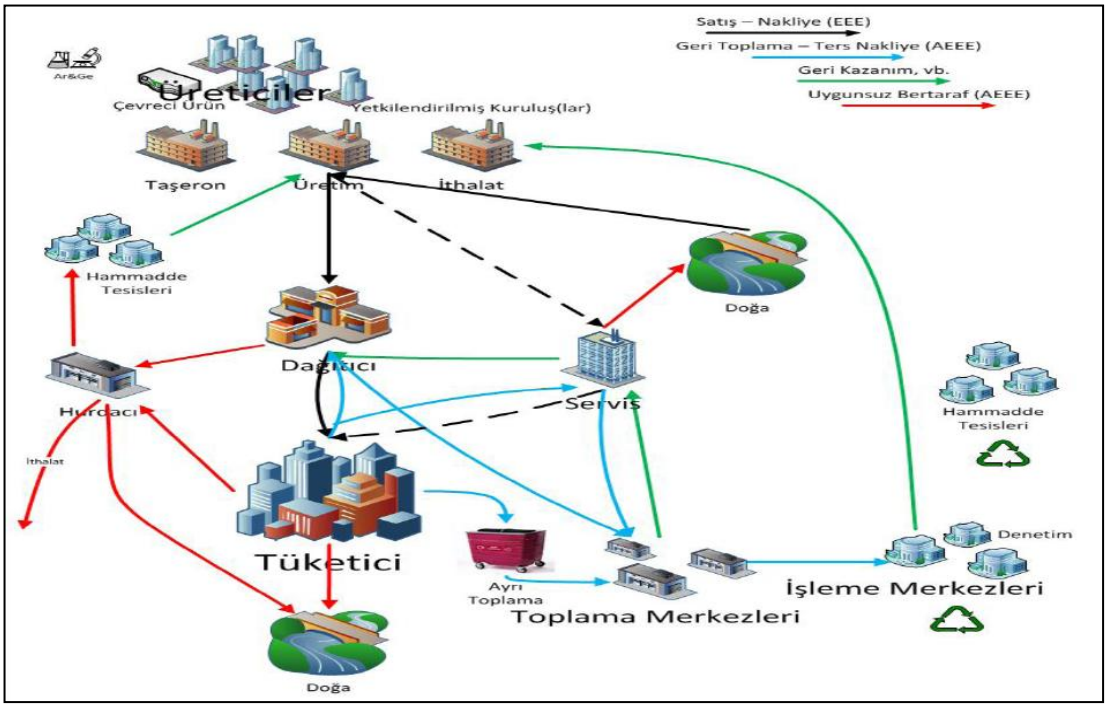


Şekil 2.2. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Hayat Döngüsü [He et al 2006]

Genel üretim döngüsü Şekil 2.2'de belirtilen AEEE hayat döngüsünde üretici, tüketici ve geri dönüşüm firmaları etkin rol oynamaktadır. Avrupa Birliği (AB) komisyonun 2008 yılındaki WEEE etki analizi raporunda elektronik atıkların direktife uygun ve uygun olmayan bertaraf ve geri dönüşüm yöntemlerinden bahsedilmiştir. Raporda %13 oranında gömme ve yakma tesislerine, %54 oranında hurdacılarda toplanan elektronik atıkların ise gömme ve yakma, kaçak ihracat, vahşi geri dönüşüm, yasal ihracat ve yasal işleme tesislerine gönderildiği tespit edilmiştir. Toplama merkezleri, belediye ve satış noktalarında toplanan % 33 oranındaki AEEE, üretici, geri dönüşüm sistemleri ve WEEE direktifine uygun geri kazanım tesislerine

gönderildiği tespit edilmiştir. Doğada oluşan maden kaynakların üreticiler tarafından işlenmesi ve dağıtım kanalı ile tüketiciye ürün olarak sunulması Şekil 2.3'de gösterilmiştir.

Bu süreç WEEE direktifin ve ülkemizde yürürlüğe girmesi için çalışmaları devam eden Atık Elektrikli Elektronik Eşya Yönetmeliğin uygulama ve iyileştirme çabalarını Şekil 2.3'de gösterilen kırmızı oklar açıklamaktadır. Doğaya tüketici, hurdacı, üretici ve servislerin kontrolsüz şekilde bertaraf ve geri kazanım işlemine tabi tutulmadan verilmesi çevre ve insan sağlığı sorunlarını etkileyen bir süreçtir. Yaşam kalitesini arttırmak ve çevre sağlığını korumak için doğadan başlayan döngüyü en temiz şekilde sonlandırılmalıdır. Şekil 2.3 günümüzde çevre kirliliğinin nasıl bir süreçte oluştuğunuda açıklamaktadır. Bilinçsizce doğaya bırakılan E-atık, onarılması güç tahribatlara neden olmakla birlikte E-atık gibi stratejik atıkların geri kazanımını engelleyen sistem önemli bir ekonomik sorun konumundadır [Sayman, 2011].



Şekil 2.3. AEEE'lerin üretimden hammaddeye Hayat Döngüsü [Sayman,2011]

2.4. Uluslar Arası Yasal Düzenlemeler

2.4.1. Basel Sözleşmesi

Tehlikeli atıklar konusunda tek küresel bakış açısına sahip Basel Sözleşmesi elektronik atıkları da etkileyen uluslararası geçerli bir anlaşmadır. Basel Sözleşmesinin hedefi "tehlikeli atıklar ve diğer atıkların yönetilmesini ve bunların insan sağlığının ve çevrenin korumasına uygun olarak sınır ötesi hareketlerinin ve her tür bertaraf tesisinde bertaraf edilmesinin düzenlemesini sağlamak" olarak belirtilmiştir. Basel Sözleşmesi tehlikeli atıkların sınır ötesi hareketlerinin kontrolünün yanında bu atıkların oluşumunu da azaltmayı amaçlamaktadır [Basel].

Basel Sözleşmesinin ana hedefi çevre dostu güvenilir yönetimlerle zararlı atık üretimini en aza indirerek insan sağlığının ve çevrenin korunmasıdır. Sözleşme üretimden depolama, taşıma, işleme, tekrar kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım ve bertaraf edilmesine kadarki tüm aşamalarda sıkı kontroller içeren bütünleşik bir mamul ömür çevrimi yaklaşımının kullanılması göz önünde bulundurularak zararlı atıkların elde edilmesini talep etmektedir [White et al, 2003].

1989 tarihli sözleşme, 5 Mayıs 1992 tarihinde yürürlüğe giren ve Tehlikeli atıkların üretiminin azaltılması, tehlikeli atıkların taşınmasının sınırlanması, bertaraf yöntemlerinin üretildikleri kaynağa en kısa mesafede ve çevreye zarar vermeyecek şekilde yapılması, ithal edecek tarafın önceden yazılı izni alınmadan yapılan yasadışı trafiğin cezalandırılmasını amaçlanmıştır. Paketleme, etiketleme ve taşıma düzenlemeleri getirmiştir. Türkiye, 28.12.1993 tarih ve 3957 sayılı Yasa ile Sözleşmeye katılmayı uygun bulmuş ve Bakanlar Kurulu'nca onaylanarak, 15.5.1994 tarih ve 21935 sayılı Resmi Gazete 'de yayınlanmıştır [Çığgın, 2006].

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı'nın 14.03.2005 tarihli Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği 2872 sayılı Çevre Kanununa ve Tehlikeli Atıkların Sınırlar Ötesi taşınması ve bertarafının Kontrolüne İlişkin Basel Sözleşmesine dayanılarak hazırlanmıştır [TAKY, 2005].

Yönetmelikte tehlikeli atık sınıfına giren elektrikli ve elektronik ekipman atıkları aşağıda sıralanmıştır.

- PCB içeren transformatörler ve kapasitörler
- Yukarda bahsedilenlerin dışındaki PCB içeren ya da üzerlerine PCB bulaşmış ıskartaya ayrılmış ekipmanlar
- Kloroflorokarbon (CFC), Hidrokloroflorokarbon (HCFC), Hidroflorokarbon (HFC) içeren ıskarta ekipmanlar
- Serbest asbest içeren ıskarta ekipmanlar
- Yukarıda bahsedilenlerin dışında tehlikeli bileşenler içeren ıskarta ekipmanlar (elektrikli ve elektronik ekipmanların arasındaki tehlikeli bileşenler içerisinde akümülatör ve piller ile tehlikeli olarak işaretlenmiş olan cıvalı anahtarlar, katot ışın tüplerin camları ve diğer aktifleştirilmiş camlar ve benzerleri bulunabilir)
- Iskartaya çıkan parçalardan çıkartılmış tehlikeli maddeler içeren parçalar [AYGE, 2008]

2.4.2. WEEE ve RoHS Direktifleri

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının gelişen teknoloji ve tüketim miktarına bağlı olarak hızlı artışı, içerdikleri zararlı maddeler ve bu atıkların çevresel etkilerine, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının mevcut idaresine, içerdikleri kaynak değerlerine, imalatçı sorumluluğu prensibine [Directive, 2002], ulusal ve uluslar arası görüşlere, yasal temellere, ekonomik değerlendirmelere ve elektrikli elektronik ekipman atıkları ve içerdikleri zararlı maddeler ile ilgili tanımlamalara yer veren [Rohs, 2003] WEEE (2002/96/EC Waste Electrical and Electronic Equipment) [Directive, 2002] ve RoHS (2002/95/EC The Restrictiton of The Use of Certain Hazardous in Electrical and Electronic Equipment) yönetmelikleri 13.02.2003 tarihinde yürürlüğe girmiştir [Rohs, 2003].

2.4.3.WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) 2002/96/EC Direktifi

Direktifin amacı; elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının oluşumunun önlenmesi ve bu tür atıkların azaltılması için yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve diğer geri kazanım şekillerinin geliştirilmesidir. Ekonomik işletmelerin (imalatçılar, dağıtıcılar ve tüketiciler) çevresel performanslarının geliştirilmesi, bu atıkların belirli bir işleme tabii tutulmasını gerektirmektedir [Directive, 2002].

Elektrikli ve Elektronik Eşya Kategorileri ve onun alt kategorilerinde bulunan ekipmanları kapsayan bu direktifte temelde kirleten öder prensibine dayanır [He et al, 2006]. WEEE kapsamındaki cihazların geri dönüşümü için bu cihazların; toplama, sınıflandırma, içerdikleri metal ve tehlike ihtiva eden maddelerin ayrıştırılması veya tamir edilerek geri kazanılması hedeflenmiştir. Bu işlemleri organize etmek ve gerekli finansmanı sağlamak sorumluluğu üreticilere yüklenmiştir. WEEE hem toplama hem de geri dönüşüm miktarları için hedefler koymaktadır. Bu konuda her ülke kendi hedefini belirlemektedir [Directive, 2002]. Ülkemizde de 2012 yılında yürürlüğe girmesi beklenen Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliğinde yıllara göre kümülatif olarak artış gösteren, yılda kişi başına toplanacak atık elektrikli ve elektronik eşyaların miktarı belirtilmiştir. Bu kota ile ülkemiz sınırları içerisinde bugüne kadar istatistiklere yansımayan AEEE kontrollü ve düzenli bir proses de lisanslı taşıma araçları kullanarak, işleme ve bertaraf tesislerinde ayrıştırma, sınıflandırma ve imha faaliyetleri yürütülmesi sağlanacaktır [Uğur Metal, 2011]. Bu direktif;

<u>Elektrikli ve Elektronik Eşya Kategorileri</u>

1. Büyük ev eşyaları
2. Küçük ev aletleri
3. Bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları
4. Tüketici ekipmanları
5. Aydınlatma ekipmanları

6. Elektrikli ve elektronik aletler (büyük ve sabit sanayi aletleri hariç olmak üzere)
7. Oyuncaklar, eğlence ve spor aletleri
8. Tıbbî cihazlar
9. İzleme ve kontrol aletleri
10. Otomatlar

Olarak belirtilen kategori ve alt kategorileri kapsamaktadır [Directive, 2002].

2.4.4. RoHS (Restriction of The Use of Certain Hazardous Substances) Direktifi

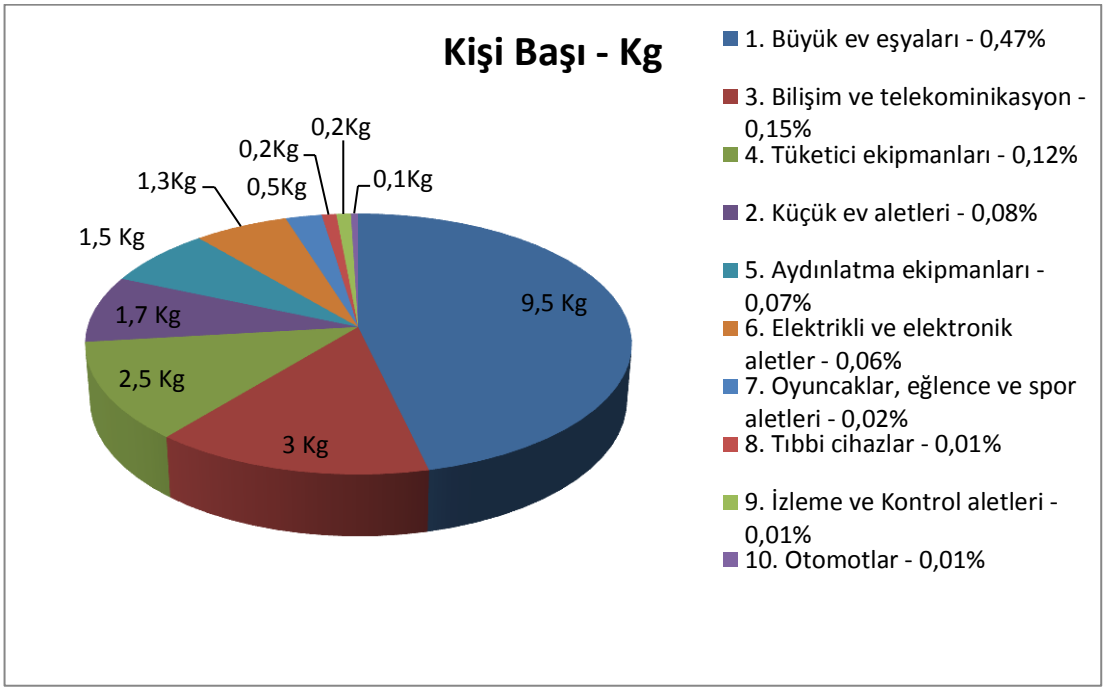
RoHS elektrikli ve elektronik malzemelerde bazı maddelerin sınırlandırılmasını şart koşan direktiftir [Birgör, 2009]. İngilizce Restriction of Hazardous Substances Directive (Belirli Zararlı Maddelerin Kullanımını Kısıtlama) kelimesinin baş harflerinden oluşur. 27 Ocak 2003 tarihinde Avrupa Konseyi tarafından kabul edilen 2002-95-EC numaralı zararlı maddelerin elektronik ürünlerde belirli zararlı elementlerin kullanımını kısıtlayan yönergedir [Rohs, 2003]. Bu direktifin yürürlüğe giriş tarihi ile Kurşun, Krom, Cıva ve Bromürlü bileşen maddelerin ağırlık olarak %0,1 oranından (1000 ppm); kadmiyum maddesinin ise ağırlık olarak % 0,01 (100 ppm) oranından daha fazla kullanımını yasaklar [Birgör, 2009]. Bu yönetmelik uygulayıcı temiz üretimle EEE' nin çevreye etkilerini kontrol etmeyi amaçlar [He et al, 2006]. RoHS kapsamında kullanımı yasaklanan 6 madde ve müsaade edilen maksimum miktarlar Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Elektrikli ve elektronik eşyalarda bazı zararlı maddelerin sınırlandırılması yönetmeliğindeki tehlikeli maddeler ve kotaları [Rohs, 2003]

Madde	Miktar
Cıva (Hg)	% 0,1
Artı altı değerlikli krom (Cr^{6+})	% 0,1
Polibromürlü bifenil (PBB)	% 0,1
Polibromürlü difenil eterin (PBDE)	% 0,1
Kurşun (Pb)	% 0,1
Kadmiyumun (Cd)	% 0,01

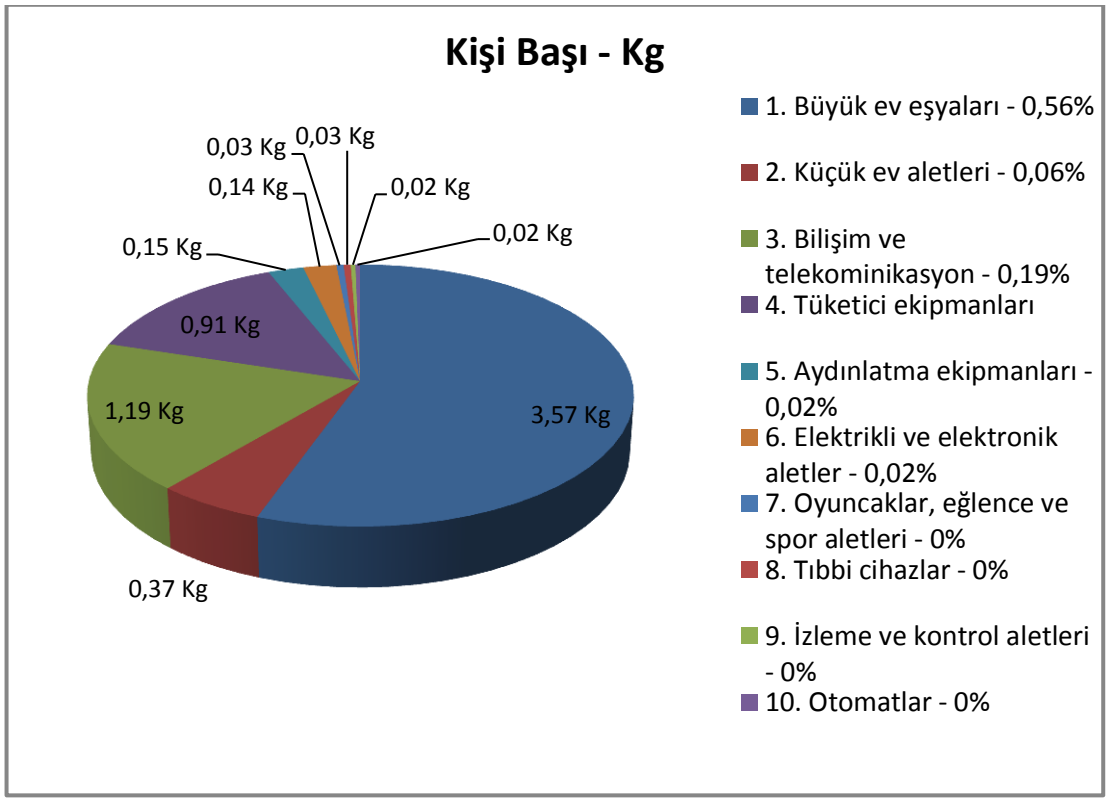
2.5. Avrupa'da Elektrikli ve Elektronik Atık Yönetimi

Avrupa birliği (AB) ülkelerinde piyasaya kişi başına 20 kg elektrikli ve elektronik eşya sürülmektedir. Bu eşyaların % 47 oranı ile büyük ev eşyaları %15 bilişim ve telekominikasyon % 12 ile tüketici ekipmanlarından % 8 küçük ev aletleri % 7 aydınlatma ekipmanları % 6 elektrikli ve elektronik aletleri %2 oyuncak ve eğlence aletleri % 1 tıbbı cihazlar ve %1 otomotlardan oluşmaktadır.



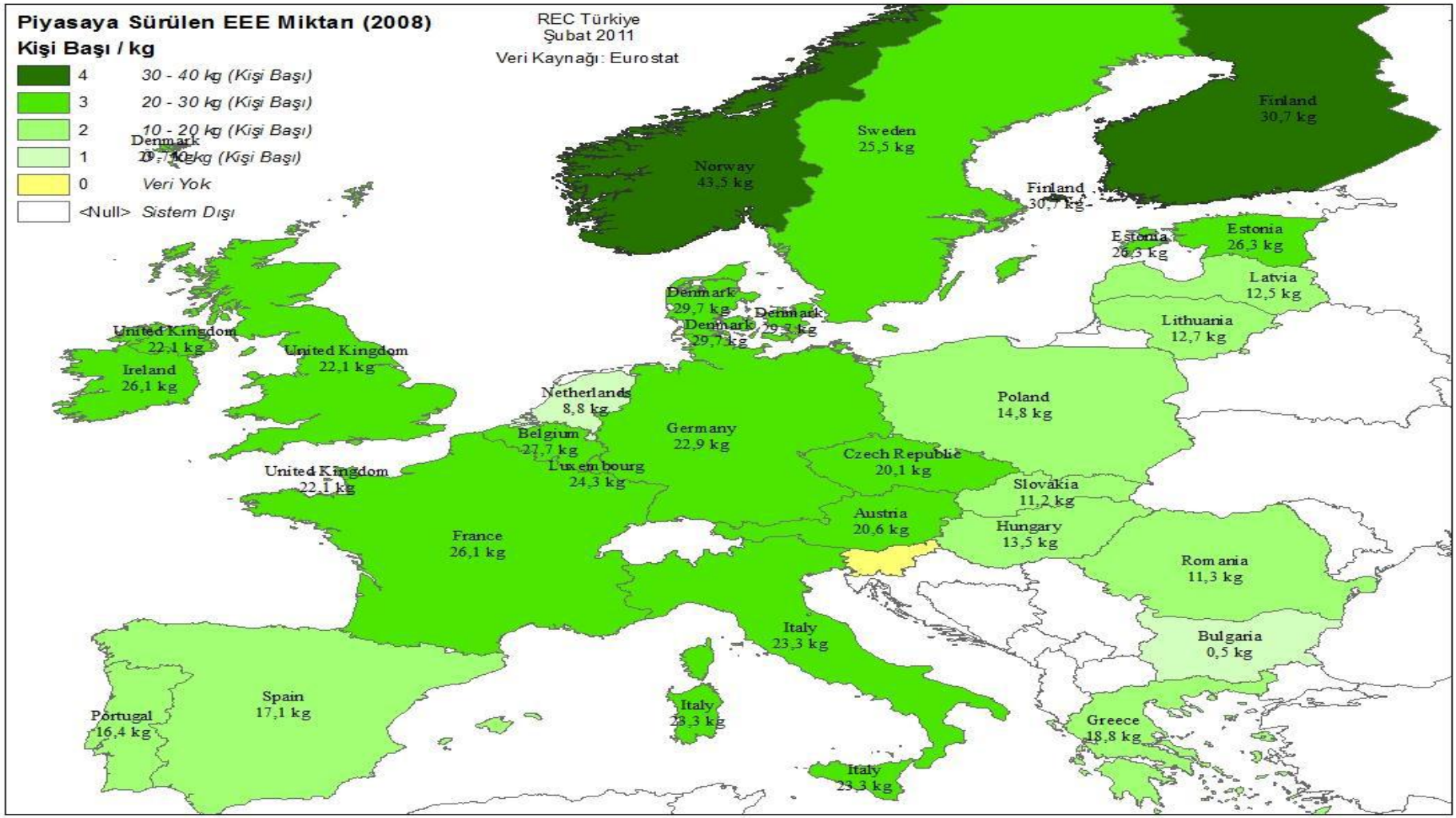
Şekil 2.4. AB Ülkelerinde Piyasaya Sürülen EEE Miktarı (kişi başı / kg) [Sayman,2011]

Piyasaya sürülen kişi başı 20 kg elektrikli ve elektronik eşya 6,5 kg kişi başı olarak toplanmaktadır. Evsel ekipmanların toplanma oranı % 84 , ticari ekipmanlarda ise % 16 civarında olduğu belirtilmiştir [Sayman,2011].

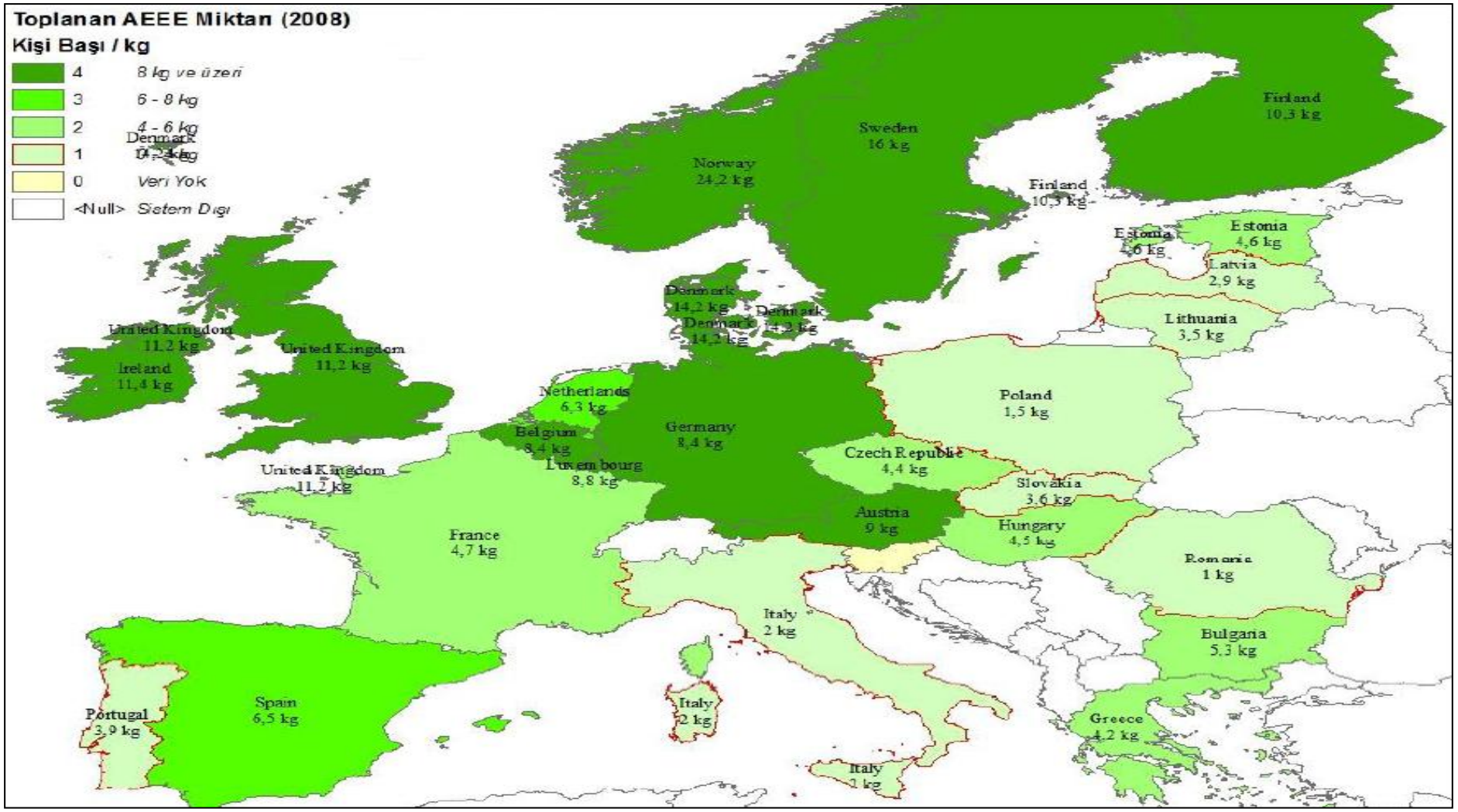


Şekil 2.5. AB Ülkelerinde Yıllık AEEE Toplama Miktarı (Kişi başı / Kg) [Sayman,2011]

Şekil 2.4'de verilen piyasaya sürülen EEE' ler (%47) ve Şekil 2.5'de toplanan AEEE miktarlarında (%56) büyük ev eşyaları, elektrikli ve elektronik ekipman kategorilerinde kişi başı - kg hesaplandığında birinci sırada yer almaktadır. 3. ve 4. Kategoride bulunan bilişim telekomünikasyon ve tüketici ekipmanları içerdiği yüksek orandaki değerli metal miktarı ile büyük ev eşyalarından sonra en fazla toplanan atık kategorileridir. Bu oranlar Avrupadaki WEEE direktifinin uygulandığı ülkelerdeki başarı oranlarını yansıtmaktadır. WEEE direktifi uygulanabilirliği arttırılmasında üreticilerin tüketiciyi teşvik etmesi ve yönlendirilmesi konusunda çalışmalar hızlandırılmıştır [Brussels, 2011]. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de verilen EEE miktarları ışığında Avrupadaki ülkelerin EEE atık yönetimi belirtilmektedir. AEEE toplama oranları ve ülke bazında başarılı ve direktifte belirtilen kota uygulamasının altındaki toplama oranı verilerine sahip ülkeler gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Avrupa'da Piyasaya Sürülen EEE Miktarı (2008) [Sayman, 2011]



Şekil 2.7. Avrupa'da Toplanan AEEE Miktarı (2008) [Sayman,2011]

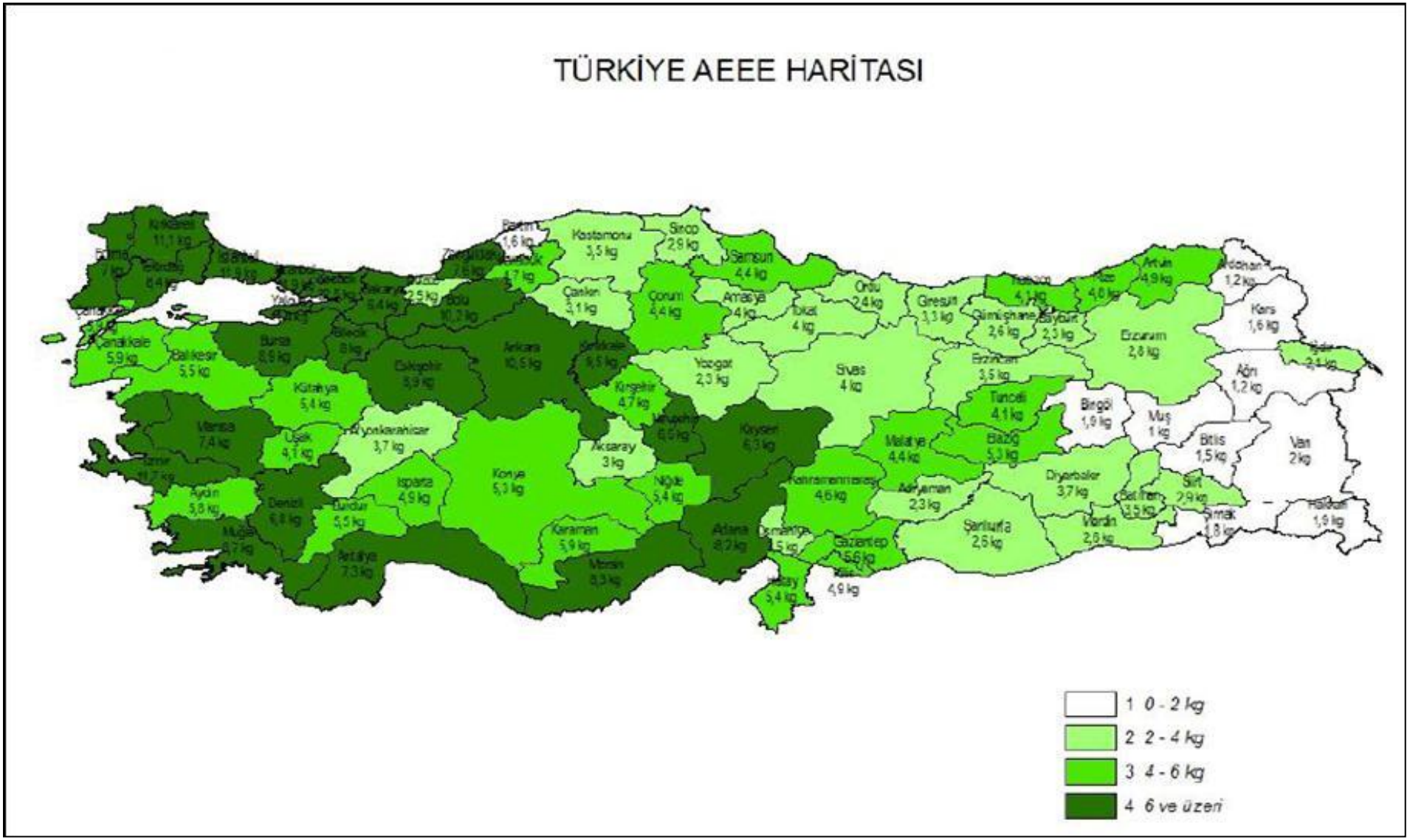
2.6. Türkiye'de Atık Yönetiminin Tarihsel Süreci ve Elektrikli ve Elektronik Atık Yönetimi

Atık yönetiminde yasal alt yapı ve ilgili paydaşların sorumluluklarının atık yönetiminin sürdürülebilir olması açısından önem taşımaktadır. Türkiye'de atık yönetimi mevzuattaki yönetmelikler ve bir uluslararası sözleşmeden oluşmaktadır. Bunlar Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (14.3.1991 tarih ve 20814 sayılı Resmi Gazete), Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (20.5.1993 tarih ve 21586 sayılı Resmi Gazete), Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (27.8.1995 tarih ve 22387 sayılı Resmi Gazete), Atıkların yakılmasına ilişkin Yönetmelik (06.10.2010 tarih ve 27721 sayılı Resmi Gazete), Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (26.03.2010 tarih ve 27533 sayılı Resmi Gazete), Ömrünü Tamamlamış Araçların Kontrolü Hakkında Yönetmelik (30.12.2009 tarih ve 27448 sayılı Resmi gazete), Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği (30.07.2008 tarih ve 26952 sayılı Resmi gazete) , Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik (05.07.2008 tarih ve 26927 sayılı Resmi gazete), Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılmasına Dair Yönetmelik (30.05.2008 tarih ve 26891 sayılı Resmi gazete), PCB ve PCT' lerin Kontrolü Hakkında Yönetmelik (27.12.2007 tarih ve 26739 sayılı Resmi gazete), Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği (24.06.2007 tarih ve 26532 sayılı Resmi gazete), Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği (25.11.2006 tarih ve 26357 sayılı Resmi gazete), Bitkisel Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği (19.04.2005 tarih ve 25791 sayılı Resmi gazete), Atık Pil va Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği (31.08.2004 tarih ve 25569 sayılı Resmi gazete), Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (18.03.2004 tarih ve 25406 sayılı Resmi gazete) Tehlikeli Atıkların Sınır Ötesi Taşınım ve İmhasının Kontrolü Sözleşmesi – Basel (15.5.1994 tarih ve 21935 sayılı Resmi Gazete) olarak sıralanabilir.

Ülkemizde Elektronik Atıkların yönetimi ile ilgili süreç Katı atıklar yönetmeliği ile 14.03.1991 tarihinde başlar. Ülkemizde 1995 yılında yayınlanan tehlikeli atıkların kontrolü yönetmeliğinin temelini oluşturan basel sözleşmesi ülke sınırlarında bulunan atığın bertarafı, atık ithalat-ihracat ve atık listesi oluşturulmasını sağlar [Çığgın, 2006].

Ülkemizde Tehlikeli atıkların kontrolü yönetmeliğin temelinde Basel sözleşme kriterleri esas alınarak elektronik atıklar ile ilgili ilk somut adım 30.05.2008 tarihinde Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılmasına Dair Yönetmelik ile atılmıştır [Birgör, 2009]. 13.02.2003 yılında Avrupa da yürürlüğe giren RoHS yönetmeliğinden uyarlanan, çevre ve insan sağlığının korunması, üreticilerin elektrikli ve elektronik cihazlardaki tehlikeli bileşenlerin sınırlandırılmasına esas alan yönetmelik, bu sınırlandırılmalardan muaf tutulacak uygulamaların belirlenmesi, elektrikli ve elektronik eşyaların ithalatının kontrol altına alınmasına dair idari, hukuki ve teknik esasları düzenleyerek elektrikli ve elektronik eşya atıklarının çevreyle uyumlu şekilde geri kazanılması amaçlar.

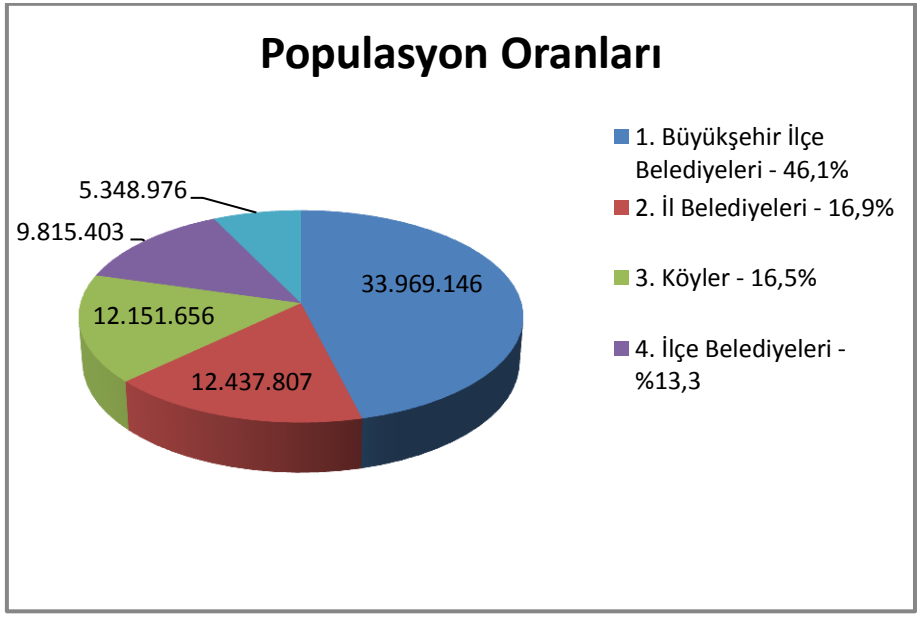
AEEE yönetimi için Almanya, İsviçre, Japonya, gibi bazı ülkeler yasal altyapılarını oluştururken bazı ülkeler ise yasal alt yapı hazırlıklarını sürdürmektedir (Türkiye gibi) [Doğan, 2009]. 2011 yılı sonu ile 565.000 ton E-Atık oluşacak ülkemizdeki çalışmalarda Avrupa'daki uygulamalardaki toplama sorunları benzerlik göstermektedir. Avrupa % 33 oranında kontrollü işleme ve bertaraf tesislerinde toplamasına karşın ülkemizdeki istatistiklerde uygunluk belgesine sahip işleme tesisleri 10.000 ton toplamıştır [Sayman, 2011]. Şekil 2.8'de ülkemizdeki kişi başına 7,5 Kg E-atık illere göre ortalama miktarları verilmiştir. Ülkemizde İstanbul, Ankara ve İzmir'de atık yoğunluğu 6 Kg ve üzeri ile en fazla oluşan iller iken doğu bölgelerimizde bu miktar 0–2 kg arasında belirtilmiştir [Sayman, 2011]. Ülkemizde 17 elektronik atık işleme tesisi [AYDB] faaliyet göstermektedir. Tesislerin yoğunluğu İstanbul ve Kocaeli çevresindeki lokasyonlarda faaliyetine devam etmektedir. Şekil 2.8'de verilen illere göre atık miktarları dikkate alındığında bu atıkların toplanmasındaki sorun çevreyi önemli ölçüde etkilemektedir. Kocaeli ve İstanbul çevresinde konumlanan tesislerin sanayi bölgelerine yakın olmasına karşın istenilen seviyede atık toplanmaması, bunun yanında bu faaliyetlerden uzak, doğu ve güney doğudaki atıkların toplama ve işlenmesi konusunda gerek elektronik atık işleme tesisi uzak olması gerekse de şuan yaptırım olmaması nedeni ile oluşan atıkların birikme yerleri ve biriken zaman göz ardı edilmemesi gerekmektedir. [Uğur Metal, 2011]. Ülkemizde 2012 yılı içerisinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya yönetmeliğinin yürürlüğe girmesi beklenmektedir.



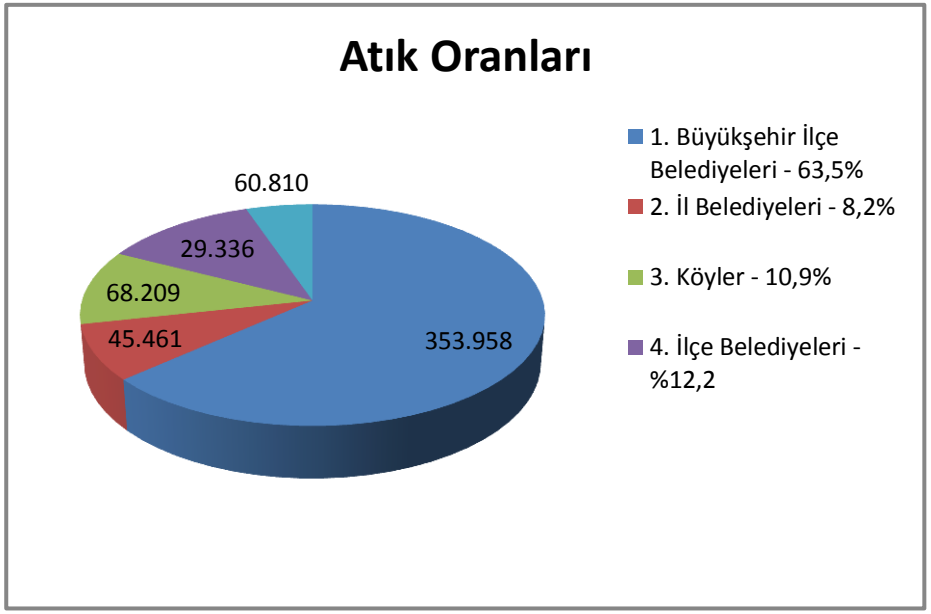
Şekil 2.8. Türkiye'de illere göre Oluşan elektronik atık miktarları [Sayman,2011]

Çizelge 2.8. Türkiyede yönetim şekillerine göre yerleşim yeri nüfusları [Sayman,2011]

YÖNETİM ŞEKLİ	POPULASYON
Büyükşehir İlçe belediye - %46,1	33.969.146
Belediye - (il belediye) - %16,9	12.437.807
Köyler - %16,5	12.151.656
İlçe belediyeler - %13,3	9.815.403
Belde belediyeleri - %7,3	5.348.976
Toplam	**73.722.988**



Şekil 2.9. Türkiye populasyon oranları



Şekil 2.10. Türkiye atık - populasyon oranı [Sayman,2011]

2.7. ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK ATIKLARIN TEHLİKELİ ÖZELLİKLERİ

2.7.1. Zararlı Maddeler ve Bileşenleri

Son yıllarda, elektrikli ve elektronik cihaz üretimi ve tüketimi gelişen teknoloji ile önemli ölçüde artış göstermiştir. Tüketim sonucu atıl durumdaki AEEE' lerde ise, sahip oldukları değerli bileşenlerin yanında çevre ve insan sağlığı açısından önemli tehlikeler yaratacak bileşenlere de sahiptir. Bu nedenle altın, bakır, gümüş gibi değerli metallerin uygun olmayan biçimde geri kazanımı veya AEEE' lerin ilkel koşullarda bertarafı, çevre ve insan sağlığını tehdit etmektedir. Kanun, yönetmelik ve denetimlerin yetersiz kaldığı, gelişmekte olan ülkelerde bu etkiler daha da net görülmektedir [Doğan, 2009].

Eski bilgisayar monitörleri ve televizyonların kırılması sonucu oluşan fosfor, kurşun ya da kabloların, yanmayı engelleyici bromür kaplı dış yüzeylerinin bilinçsizce yakılması sonucu atmosfere karışan dioksinler, elektronik devre kartlarının yakılması sonucu ortaya çıkan zehirli bileşenler, cıva ihtiva eden bileşenlerin kırılması veya zarar görmesi sonucu cıvanın toprağa ya da suya karışması**,** soğutucu cihazlarda bulunan klorofolokarbon ve freon gazlarının atmosfere salınması sonucu oluşan sera etkisi, PoliklorürBifenil ihtiva eden bileşenlerin suya karışması sonucu meydana gelebilecek kirlenmeler çevreyi etkileyen faktörlerdendir [Ilgar, 2010].

Elektronik atık komposizyonu, teknolojik gelişmeler ve üretici üzerindeki baskılar ile zaman içerisinde değişmektedir. CRT (Katot ışınlı tüpler) monitörler yerine LCD (Sıvı kristalli ekran) ekranlar almaya başlamıştır. Bununla birlikte CRT içerisinde bulunan ve yaklaşık 2 Kg civarındaki Kurşun (Pb) azalıp [Puckett et al, 2005] yerine LCD ekranlardaki cıva(Hg), indiyum(In), kalay(Sn) ve çinko(Zn) ağır metaller oluşmaktadır [Li et al, 2009]. Ayrıca bakır kablolar yerlerini fiber optik kablo, asbest yerine seramik fiber malzemeler ile değişmektedir. Şarj edilebilir pil komposizyonu da Nikel-Kadmiyum türünden Nikel metal hidrit ve lityum iyon pillere dönüştürülmüştür [Robinson, 2009].

Elektrikli ve Elektronik Atık İçerisindeki Zararlı Madde ve Bileşenler

- Poliklorbifeniller (PCB) içeren kapasitörler,
- Şalter veya arka ışık lambaları gibi cıva ihtiva eden bileşenler,
- Piller,
- Cep telefonların basılı devre kartları, diğer cihazlarda alanı $10cm^2$'den büyük devre kartları,
- Renkli toner dahil olmak üzere sıvı ve katı akışkan toner kartuşları,
- Bromlu alev geciktirici içeren plastikler,
- Asbestli atıklar ve asbest ihtiva eden bileşenler,
- Katot ışın tüpleri
- Kloroflorokarbonlar(CFC),Hidrokloroflorokarbonlar(HCFC),Hidroflorokarbonlar(HFC) ve Hidrokarbonlar(HC)
- Gaz deşarj lambaları,
- Alanı $100cm^2$'den büyük olan sıvı kristalli ekranlar (gerekirse bulundukları kasa ile birlikte),
- Dış elektrik kabloları,
- Yanmaz seramik fiberler ihtiva eden bileşenler,
- Radyasyonla ile ilgili yasa ve yönetmeliklerde verilen emniyet limitlerin altında kalanlar hariç, radyoaktif maddeleri ihtiva eden bileşenler,
- Yüksekliği ve çapı 25mm'yi geçen veya benzer bir hacme sahip olan elektrolit kapasitörler
- Atık yağ [Tsydenova and Bengtsson, 2009]

Kapasitör

Tehlikeli madde içeren kapasitörler elektrolit ve (Poliklorbifenil) PCB içeren kapasitör olarak ikiye ayrılır.

Elektrolit Kapasitörler

1µF'den 1Farad'a kadar aralıktaki alüminyum kapasitörler küçük ve ucuzdur. Genellikle 450 voltta kadar çalışan voltaj için uygun olan alüminyum elektrolit

kapasitörler, alüminyum folyo üzerindeki alüminyum oksit tabakasını kullanır. Alüminyum folyo formları ince kağıt ayırıcı içerisinde suda çözülmeyen elektrot ve katot için diğer folyo tabakadan oluşur. Orijinal elektrolit formülü glikol veya amin içerir. 100µF - 10V alüminyum kapasitörün içeriği tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.9. 100μF - 10V alüminyum kapasitör içeriği

Bölüm	İçerik(g)	İçerik(%)
Alüminyum Folyo	0,17	16
Kağıt ve Elektrolit	0,18	17
Kapsül(Alüminyum)	0,35	33
Bakır Kablo	0,12	11
Lastik kapak	0,23	22

%25 eşik konsantrasyonundan fazla ise tehlikelidir, % 17 den küçük glikol içeriği bulunan elektrolit tehlikesizdir.

PoliKlorBifenil içeren kapasitörler

PCB'ler elektrikli ve elektronik ekipmanlarda kapasitör ve transformatörlerde geniş bir oranda kullanılır. Açık uygulamalarda kullanımı 1972 yılında Avrupa da büyük bir oranda yasaklandı. 1986'dan beri yeni uygulamalarda kullanılmayan PCB içeren kapasitör iki kategoriye ayrılır. Küçük kapasitörler; floresan, deşarj lambaları, beygir gücü motorlar, evsel ve endüstriyel elektrik ekipmanlarında kullanılır. Büyük kapasitörler, güç faktör düzeltmesi ve benzer görevlerde kullanılır [Gupta, 2008].

PCB, bir grup aromatik klorlu bileşik olan poliklorlu bifenillere verilen genel isimdir. PCB'ler uygun olmayan koşullarda yakıldıklarında, tam yanma ürünleri oluşmamakta bundan dolayı günümüze değin insan ve çevre sağlığı için bilinen en toksik kimyasallar olan dioksin ve furanlar ortaya çıkmaktadır. PCB'ler yaygın biçimde, ısı transferi ve hidrolik sistemlerde transformatör ve kondansatörlerde (kapasitörler)

yalıtkan sıvı olarak kullanılır. PCB'ler bilinen en kararlı organik kimyasallar arasında yer almaktadır. Düşük yalıtkanlık sabitleri ve yüksek kaynama noktaları elektrikli transformatörleri ve kondansatörlerde yalıtkan sıvı olarak kullanılmaları için onları ideal hale getirmektedir.

PCB' lerin genel özellikleri;

- Buhar basınçları çok düşüktür
- Yangına dayanıklıdır
- Suda çözünmezler
- Elektrik iletkenlikleri çok düşüktür.
- Çok yüksek kimyasal kararlılığa sahiptirler.

Transformatörler ve kondansatörler PCB içerebilirler, fakat yalnızca transformatörler içerdikleri PCB'den arındırılmak üzere işleme tabi tutularak yeniden kullanıma hazırlanabilir [ÇOB, 2009].

Cıva İçerikli Bileşenler

Dünyadaki cıva tüketiminin %22'si elektrikli ve elektronik eşyaların üretiminde kullanılır [Gupta, 2008]. Cıva anahtar ve aktarma cihazlarında, pil ve gaz deşarj lambalarında kullanılır [Cui and Forssberg, 2003]. Tehlikeli özelliklerinden dolayı RoHS direktifi kapsamında cıva içeren elektronik malzemelere sınırlama getirilmiştir [RoHS, 2003].

Pil

Piller, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren, kompleks elektro kimyasal aletlerdir. Pil hücresi, metal anot (negatif elektrot), metal oksit katyon (pozitif elektrot) ile iki elektrot arasında kimyasal reaksiyonu sağlayan elektrolitten ibarettir [Öztürk, 2008]. Piller değişik boyut, genişlik ve tipte üretilmektedir. Bunlar arasından Cıva içeren ve Şarj edilebilir piller (Kadmiyum, Kurşun, Lityum içeren) endişe yaratmaktadır [Cui and Forssberg, 2003]. Cıva içeren piller tehlikeli özelliklerinden

dolayı çoğu ülkede yasaklatılmıştır. Taşınabilir pilleri 3 ana gruba ayırabilmek mümkündür

- Şarj Edilmeyen Piller
- Şarj Edilebilen Piller
- Düğme Piller [TAP]

Piller çöpe atıldığı zaman katı atık depolama sahasında zamanla bozularak bazı tehlikeli ve zararlı maddeler serbest hale geçer. Bunlar cıva, kurşun, kadmiyum ve bileşikleridir. Cıva ve cıva bileşikleri halk ve çevre sağlığı bakımından çok tehlikeli ve toksiktir. Akan pildeki cıva hızla deri veya solunum yolu ile vücuda girebilir. Kadmiyum ise sızıntı suyu, içme suyunu ve toprağı kirleterek gıda zinciri ve içme suyu yolu ile insan vücuduna girer. Cıva ve kadmiyum kadar tehlikeli olan kurşun vücut da ciğerlere kadar ulaşır ve ciğerlerde yavaş yavaş absorbe edilerek kana karışır [Öztürk, 2008].

Baskı Devre Kartları

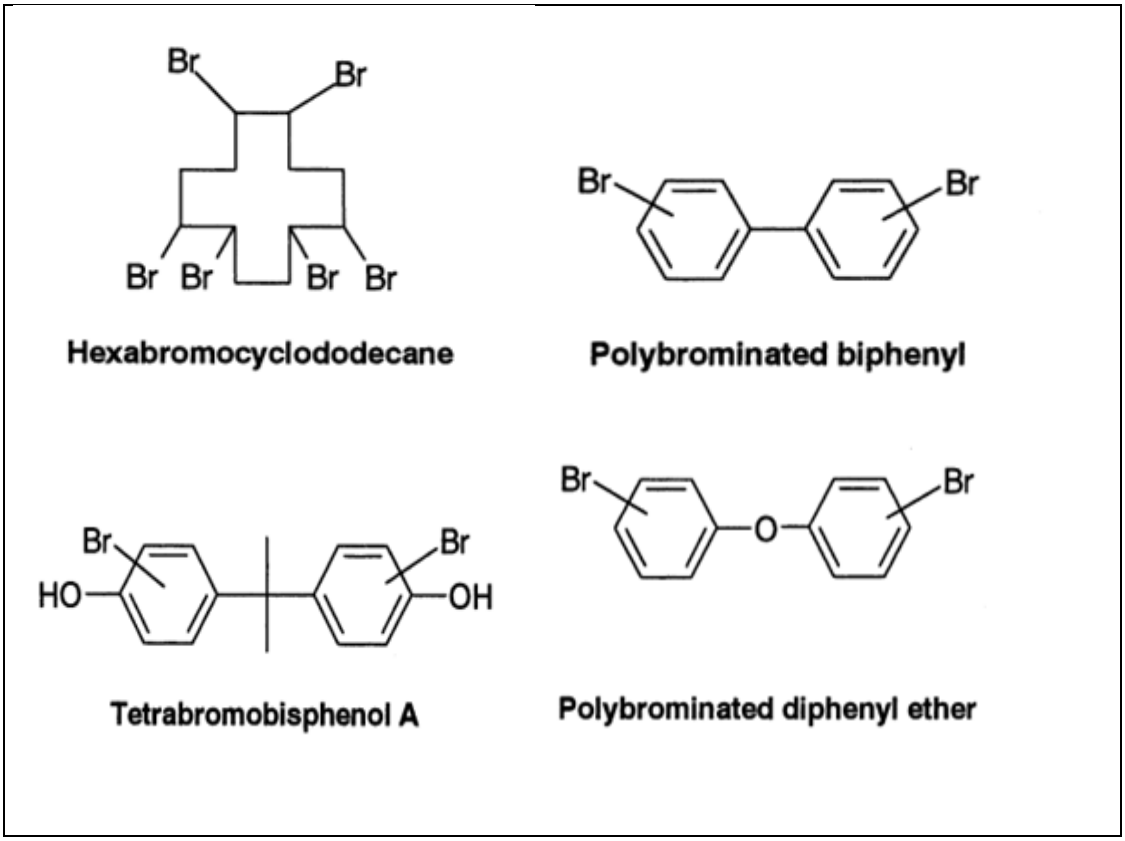
Baskılı devre kartı, elektronik devre elemanlarını monte etmek için bakır yolları, içi lehim kaplı delikler ve bakır adalar içeren değişik materyallerden yapılmış plakalardır [Dursun, 2009]. Devre kartları içerisinde yarı iletken çip ve diğer bileşenler (direnç, anahtar, kapasitör) monte edilmiştir [Cui and Forssberg, 2003]. İçerisinde önemli miktarda bakır ve değerli metaller olan altın, gümüş, paladyum bulunur. Değerli metaller yanı sıra antimon, berilyum, kadmiyum, kurşun, klor, brom ihtiva etmektedir. Ayrıca cıvalı aktarıcı ve anahtar, kapasitörler, ışık yayan diyotlardan oluşur. Işık yayan diyotlar çevre etkisi olan galyum arsenid içerir ve uzaklaştırılması gerekir [Dursun, 2009].

Sıvı Toner Kartuşları

Kartuşlar solventli toner artıklarını içerir. Bazı toz halindeki renkli tonerler ağır metal veya potansiyel tehlikeli maddeler içerir [Irasarri, 2005] .

Bromlu Alev Geciktirciler

Kolay tutuşabilen ve EEE üretiminde ürünlerin, malzemelerin alev almasını engellemek için Bromlu alev geciktirici (BAG) kullanılır. Alev geciktirici ürünler plastik, tekstil, elektronik devre, televizyon, mikrodalga fırın, elektrik düğmesinde kullanılır [Herat, 2008] .



Şekil 2.11. Bromlu alev geciktirici türleri

Dünyadaki BAG endüstrisinin %59'u baskılı devre kartı ,%9 bağlayıcı ve aktarma, %2'si Kabloları oluşturmaktadır [Herat, 2008] [Hyoëtylaëinen and Hartonen 2002].

Normal gelişme için hormonal fonksiyonları önemli derecede etkileyen BAG, Plastiklerde alev geciktirici olarak kullanılırlar. BAG işyeri ve ofislerdeki bilgisayar üzerindeki tozlarda, plastiklerde, basılı devrelerde, bağlantı parçalarında, kablolarda, süngerlerde bulunmaktadır. Düşük sıcaklıklarda yakılması çok zehirli polibromine dioksin ve furan oluşturur. İşyeri ve ofislerdeki bilgisayarlar üzerindeki tozlarda bulunan BAG' ye İsveç'te anne sütünde çok fazla miktarda rastlanılmıştır [EPA].

Asbest

Asbest, bir dizi doğal, lifsi silikat mineralini ifade etmek için uygulanan geniş kapsamlı bir terimdir. Bunların tamamı, ateşte yanmayan, asitlere dirençli ve iletkenlik özelliği olmayan minerallerdir. Asbest bazı endüstri kollarına vazgeçilmesi zor bir madde olmasına karşın sağlık açısından çok büyük risk taşımaktadır. Asbest eski EEE uygulamalarında, ütü, kahve ve tost makinalarında kullanıldı. Modern uygulamalarda asbest kullanılmamaktadır [Ogilvie, 2004].

Asbest insan vücuduna solunum ve sindirim yoluyla alınıp Sindirim yoluyla insan vücudundan atılabilmektedir. Ancak asbest lifleri solunduğunda akciğerde, tedavisi mümkün olmayan sonuçların doğmasına neden olabilmektedir. Asbest, kimyasal etkilere ve mikroorganizmalara dayanıklı olma özelliği nedeniyle vücudun savunma istemi tarafından elimine edilmesi imkânsız hale gelebilmektedir. [Emiroğlu, 2006]. Asbest insanlara zararlı etkilerinden dolayı bertaraf edilmesi gerekmektedir [Cui and Forssberg, 2003].

Katot Işın Tüpleri

Katot ışın tüpü (CRT) teknolojisinin eskimesi ve yerini yavaş yavaş LCD (sıvı kristal ekran) teknolojisine bırakması önemli miktarda televizyon ve bilgisayarın atık haline geleceğini göstermektedir. CRT veya diğer adı ile kineskop, televizyonların veya bilgisayar monitörünün ağırlıkça %65'ini teşkil eder. CRT camı miktarının yanında (huni camı) kurşun içeriği nedeniyle önem taşır. Bu nedenle CRT camlarının geri kazanımı üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [Doğan, 2009].

Kloroflorokarbonlar

Klorflorokarbonlar (CFC); buzdolapları, havalandırma sistemleri ve dünyanın birçok yerinde de metal temizleme işinde itici gaz ve aynı zamanda köpürtme ajanı olarak ve diğer başka minör amaçlar için kullanılmaktadır [Qin, 2007].

Bütün iklimlendirme donanımlarında CFC, hidrokloroflorokarbon (HCFC) ve hidroflorokarbon (HFC) gibi soğutucu akışkanlar kullanılır. Devrelerde kaçak olması durumunda, soğutucu akışkan atmosfere sızar ve küresel ısınmaya katkıda bulunur [Bulgurcu ve ark, 2007] . Üretim kayıpları ve bu gazların kullanıldığı cihazlardan kaçaklar nedeni ile atmosfere salınan CFC gazları kimyasal açıdan oldukça tepkisizdir. Ancak CFC gazlarının atmosferde bilinen en önemli tepkimesi O_3 ozon gazı ile stratosferde gerçekleşmektedir. Atmosferin insan sağlığı açısından önemli bir tabakası olan ozon tabakasında incelmeye neden olan bu etkinin ortaya çıkmasının ardından 1987 yılında montreal de imzalanan bir protokol ile CFC gazı üretiminin sınırlandırılmasına karar verilmiştir. Üretimi durdurulan CFC gazlarının yerine atmosferik ömrü daha kısa olan HCFC gazlarının kullanımı yaygınlaşmıştır. HCFC gazlarının atmosferik ömürleri CFC'lere oranla daha kısa olduğundan ozon takasına verdikleri zarar daha azdır [Özyurt, 1998]. Alternatif olarak görülen bu bileşiklerin 2020'den itibaren klor içermeyen hidroflorokarbonlarla değiştirilmesi planlanmaktadır [Buğdaycı, 2008**].** HFC'lerin yapısında klor atomu bulunmadığı için ozonu delme potansiyelleri sıfırdır. Buna rağmen küresel ısınmaya bir miktar etki yaparlar [Bulgurcu ve ark, 2007] **.**

Gaz Deşarj Lambaları

Bu lambalar; floresan lambaları, düşük tüketim ve sodyum buharlı lambalar olarak adlandırılır. Birde profesyonel foto optik cihazlarda cıva buharlı lambalar bulmak mümkündür. Cıvanın oda sıcaklığında buharlaşmak için buhar basıncı yeterince düşük olduğundan bu tip lambalar çeşitli miktarda cıva içermektedir.

Sıvı Kristalli Ekran (LCD)

LCD dizüstü bilgisayar, düz ekran televizyon, otomatik kasa gibi farklı tip ekranlarda bulunur. Sıvı kristal alaşımın hem sağlık hem de çevre için problem sunulmadığı görülür. Problem genellikle gerekli ışıklandırmayı sağlamak için arkaya konulan floresanlardadır. Plazmalar arka ışık lambaları bulunmaz. Küçük LCD'ler cıva içermeyen LED kullanarak ışıklandırma yapılır [Irasarri, 2005].

Seramik Fiber

Seramik fiberler çok miktarda amorf veya kristal malzemeden oluşur. Sentetik mineral lifler ateşe dayanıklı özellikleri ile nitelendirilir. Yüksek sıcaklıklarda kararlı Seramik fiberler genellikle alüminyum ve silisyum oksit, diğer metal oksitler, oksitsiz malzemeler silikon karbür gibi malzemelerden oluşur.

Seramik lifler genellikle yalıtım malzemesi ve asbestin yerini alan önemli bir malzeme olarak kullanılır. Seramik fiberler yüksek sıcaklığa karşı koyan özelliği nedeniyle fırın kaplamalarında, baskı devre kartları ve gemi yapımında, elektrikli ısıtıcı, ütü de kullanılır. İnsan sağlığına etkileri; solunumla kansere ve deride kızarıklara neden olur [Gupta, 2008] [IARC, 1988].

Radyoaktif Madde İçeren Bileşenler

Bazı endüstriyel (nem, yoğunluk, kalınlık, ağırlık, seviye ölçen) ve profesyonel ekipmanlar (ilaç) radyoaktif madde içerir. Sıkı kontrol edilen konu olmasına rağmen AEEE de açıklanamayan bazı ekipmanların bu tip bazı parçalarında görülebildiğinden dikkate almak önemlidir. Amerikyum-241 içeren duman detektörler ev, otel, hastane, kamusal alanlarda kullanılır. Belirtilen detektörlerin radyoaktif emisyonları yasaya göre belirtilen limitlerin altındadır ve zararsız olarak hesaplanır. Ama bu detektörler öğütücü veya fırına girdiği zaman veya kontrolsüz olarak dağıldığında endişe yaratır [TAEK, 2011].

Yağlar

Kullanılmış motor yağları tehlikeli atıklardır. Doğru bir şekilde yönetilmedikleri zaman hem çevreye hem de ekonomiye ciddi zarar verirler. Kullanılmış yağların suda çözünmesi çok düşük ve yavaştır. Yağların suda dağılması dökülen yağın özelliğine de bağlıdır. Toprağa dökülen kullanılmış yağ ise bitkilerde tahribata yol açar, toprak ürünlerinin azalmasına neden olur. Toprağa dökülen kullanılmış yağ, bitkiler tarafından absorbe edilir. Topraktaki besin zincirinde birikir ve insanların zehirlenmesine dahi neden olur. Kullanılmış yağ yüksek miktarda kurşun, arsenik, kadmiyum, krom gibi ağır

metallerde içerebilir ve toprakta birikebilir. Bitkiler, yüksek konsantrasyondaki ağır metalleri absorbe ederler [Öztürk, 2008].

2.7.2. Elektrikli ve Elektronik Atık İçeresindeki Ağır Metallerin İnsan Sağlığına Etkileri

Elektrikli ve elektronik atık içerisinde bulunan ağır metaller, su, toprak ve havada düşük konsantrasyonlarda bulunmaları durumunda bile çeşitli hastalıklara ve hatta ölümlere yol açabilmektedir. Eser miktarda bile toksik etki yapabilen bu ağır metaller arasında en önemlileri Gümüş, berilyum, kadmiyum, krom, kurşun, mangan, cıva, nikel, çinko sayılabilir. Ağır metallerin önemli bir kirletici grubu oluşturdukları bilinmektedir. Bunların toksik ve kansorejen etkileri olduğu gibi, canlı organizmalarda birikme eğilimi (biyobirikim) de söz konusudur.

Biyobirikim, zamanla biyolojik bir organizmada bir kimyasal konsantrasyonun, doğadaki konsantrasyonuyla karşılaştırıldığında artması demektir. Bileşiklerde vücuda alınmaları ve depolanması, metobolize edilmelerinden veya atılmalarından daha hızlıdır.

Ağır metaller zihinsel, nörolojik ve hormonal faaliyetleri etkilemektedir. Dolayısıyla insan davranışları üzerinde olumsuz etki yaratır. Ağır metallerin çalışmasını etkilediği sistemler

- Kan ve dolaşım sistemi,
- Toksin atma sistemleri (bağırsaklar, karaciğer, böbrekler, cilt)
- Hormonal sistem,
- Enerji üretim sistemleri, enzimler, mide, bağışıklık,
- Sinir ve üretim sistemleri ve boşaltım sistemidir [Filiz, 2007].

3.ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK ATIKLARIN GERİ KAZANIM YÖNTEMLERİ

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanım işlemi, atığın oluşmasıyla başlar ve atığın geri dönüşüm tesisine nakliyle devam eder. Atık içerisindeki materyallerin serbest hale getirilmesi ve ardından da boyut küçülme ve boyut farkına göre ayırma işlemlerinin yapılması önemlidir. Geri dönüşüm işleminde, değerli materyaller ile değersiz materyallerin birbirinden ayrılması amaçlandığı gibi değerli olan materyallerin ayrı saflıkta birbirinden ayrılması da öngörülür. Bu nedenle, materyallerin özelliklerine bağlı olarak, bir veya birkaç yöntem birlikte uygulanabilmektedir [Çığgın, 2006].

E-Atıkların İçerisindeki değerli metallerin kazanılması için bugüne kadar birçok deney gerçekleştirilmiştir. Bu yapılan çalışmalarda E-atık içerisindeki değerli metallerin kazanımında yüksek verimlilik sağlayan 4 yöntem öne çıkmıştır. Bu yöntemler Altın, Paladyum, Gümüş gibi elementlerin kazanılmasında yüksek verimlilik sağlarken birlikte kullanılabilir yöntemler olması ile de verimde en yüksek seviyede geri kazanım hedefini sağlar. Gelişen teknoloji ile beraber elektronik atık miktarı artmakta fakat kullanılan ekipmanlardaki değerli metal oranı azalmaktadır. Geri kazanım tesislerindeki Ar-Ge departmanları klasik proseslerdeki değişim ile en az maliyet gerektiren ve kirletici çıkışını minimize eden yöntemler üzerinde çalışmaya devam etmektedir.

Ülkemizde 2011 yılında 17 tane uygunluk belgesine sahip elektronik atıkların toplanması ve işlenmesi için yetkili tesis bulunmaktadır [AYDB]. Bu tesisler AEEE genelgesindeki kriterlere bağlı kalarak mevcut tesislerindeki ekipmanlar doğrultusunda AEEE yönetmeliğindeki kategorilerin toplanmasını, tehlikeli madde ihtiva eden ekipmanların bertaraf tesisine gönderilmesi ve değerli metal içeren baskı devre kartlarını yurt dışındaki geri kazanım tesislerine göndermektedir [Uğur metal, 2011].

3.1. Elektrikli ve Elektronik Atıkların Fiziksel Özellikleri

Kullanım ömrü dolan veya diğer nedenlerle atıl durumuna gelen elektrikli ve elektronik ürünler (bilgisayar, televizyon, baskılı devre kartları vb.) içerdikleri yüksek metal ve değerli metal oranları dikkate alındığında önemli bir ikincil kaynak olarak değerlendirilebilir. E-atıklardan metallerin geri kazanım süreci ekonomik ve çevresel yönden çeşitli avantajlara sahiptir [Yazıcı ve Deveci, 2009].

- Birincil kaynakların tükenme hızının azaltılması
- Katı atık miktarının azaltılması
- Metal dışı malzemelerin (plastik vd) kazanılması,
- Demir, demir dışı (Çelik, Aliminyum, Bakır) ve değerli metallerin kazanılması gibi faydalar sağlamaktadır.

Elektrikli ve elektronik ekipman hurdaları çeşitli metal ve plastik malzemelerin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Bu hurdalar, bakır, alüminyum ve altın gibi birçok metalin ikincil kaynakları arasında gösterilmektedir. Elektrikli ve elektronik ekipman hurdalarındaki bu malzemelerin efektif olarak ayrılabilmesi bu malzemelerin fiziksel özelliklerindeki farklılıklara bağlıdır. Bu fiziksel karakterizasyon farklılıkları, mekanik geri dönüşüm sistemindeki ayrıştırmada da kullanılan yöntemlerdendir [Eskici, 2006].

3.1.1. Manyetik, Yoğunluk ve Elektrik İletkenliği Özellikleri

Elektrikli ve elektronik ekipmanlar da kullanılan bazı materyaller için manyetik çekim, yoğunluk ve elektriksel iletkenlik farkına göre ayrım yapabilmek için özellikleri bilinmesi gerekir. Fiziksel yöntemlerde Çizelge 3.1'deki gibi manyetik duyarlılık farkı veya Çizelge 3.2'deki iletkenlik ve yoğunluk farkları kullanarak metallerin metal grupları veya plastik ve bileşenlerden ayrılması sağlanmaktadır. Geri kazanım tesislerinde elektronik atıkların besleme konveyöründen sisteme girişi ile başlayan ayrıştırma işlemlerinde demir ve bakırın manyetik duyarlılıkları, alüminyumun iletkenlik özelliği ve bakır, plastik karışımının saflaştırılmasında yoğunluk farkı özelliklerinden yararlanılır [Cui and Forssberg, 2003].

Çizelge 3.1. Bakır Alaşımlarının Manyetik Duyarlılık Değerleri [Cui and Forssberg, 2003]

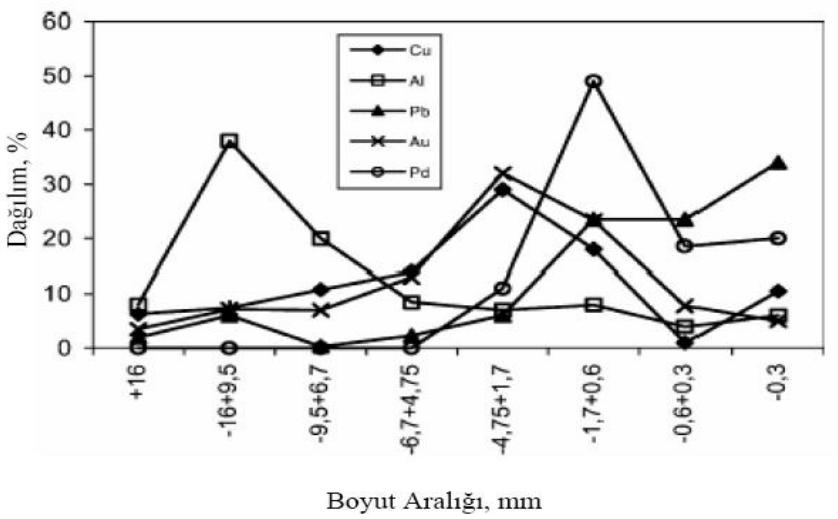
Materyaller	**Fe oranı (%)**	**Kütlesel Duyarlılık ($m^3 . Kg^{-1}$)**
Alüminyum-Bronz bileşiği	2-4	6,5-11,5 x 10^{-7}
Manganez-bronz bileşiği	1,5-3	0,7-2,4 x 10^{-7}
Özel pirinç	0,7-1,2	1,3-5,8 x 10^{-7}
Pirinç (Fe ihtiva etmeyen)	<0,2	<0,1 x 10^{-7}
Kalay ve kurşun bronzu	<0,2	<0,1 x 10^{-7}

Çizelge 3.2. Metallerin Bazı Fiziksel Karakteristikleri [Cui and Forssberg, 2003] [Çığgın, 2006].

Materyaller	**Yoğunluk (Kg.m^{-3})**	**Elektriksel iletkenlik ($m^{-1}.\Omega^{-1}$)**	**Elektriksel iletkenliğin yoğunluğa oranı ($m^2.\Omega^{-1}.Kg^{-1}$)**
Cu	8,96x10^3	59,60x10^6	6,65x10^3
Cu-Zn Alaşımı (Ms 58)	8,4x10^3	1,90x10^6	0,23x10^3
Cu-Zn (Fe ihtiva	8,4x10^3	15,00-26,00x10^6	1,79-3,10x10^3
Ni	8,9x10^3	14,30x10^6	1,61x10^3
Co	8,9x10^3	17,20x10^6	1,93x10^3
Li	0,53x10^3	21,00x10^6	39,62x10^3
Al	$2,7x10^3$	37,70x10^6	$13,96x10^3$
Fe	7,86x10^3	9,33x10^6	1,19x10^3
Alaşımlı Çelik	7,7x10^3	0,70x10^6	0,09x10^3
Sn	7,3x10^3	9,17x10^6	1,26x10^3
Cd	8,65x10^3	13,80x10^6	1,60x10^3
Cr	7,19x10^3	7,74x10^6	1,08x10^3
Pb	11,4x10^3	4,81x10^6	0,42x10^3
Mn	7,43x10^3	0,70x10^6	0,09x10^3
Ag	10,5x10^3	63,00x10^6	6,00x10^3
Ta	16,6x10^3	7,61x10^6	0,46x10^3
Ti	4,51x10^3	2,34x10^6	0,52x10^3
W	19,3x10^3	18,90x10^6	0,98x10^3
Zn	7,14x10^3	16,60x10^6	2,32x10^3
Mg	1,74x10^3	22,60x10^6	12,99x10^3
Au	$19,3x10^3$	45,20x10^6	$2,34x10^3$

3.1.2. Partikül Boyutu Özellikleri

Partikül boyutu, şekli ve serbestleşme derecesi mekanik geri dönüşüm prosesi için çok önemli bir rol taşımaktadır. Hemen hemen tüm mekanik geri dönüşüm proseslerinde kesin bir efektif boyut ölçüsü vardır. Efektif bir ayırma tekniği seçmek için parça boyutu özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca metal içeriklerini yükseltmek için eleme prosesi getirilmelidir [Cui and Forssberg, 2003].



Şekil 3.1. Partikül Boyut aralığı – Dağılım grafiği [Cui and Forssberg, 2003]

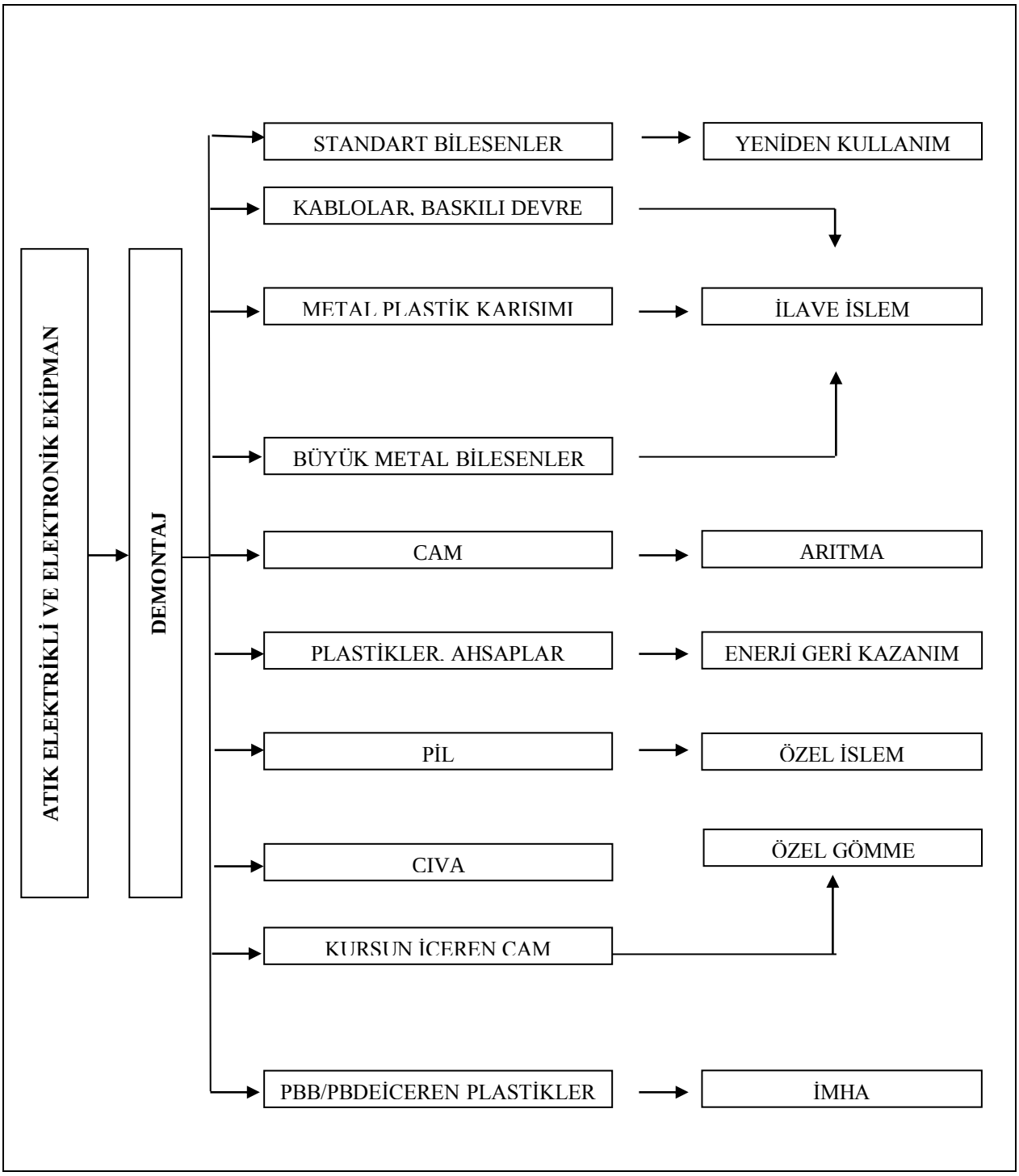
3.2. Ön Hazırlık İşlemleri

Elektrikli ve elektronik cihazların içerdikleri bileşenlerin çeşitliliği ön hazırlık işlemlerini zorunlu kılar [Tuncuk ve ark 2011]. Geri kazanımı planlanan kişisel bilgisayarların parçaları ilk işlem olarak temel kısımlarına elle veya otomatik olarak ayrılır. Herhangi bir geri kazanım işleminden önce bazı büyük parçalar elle birbirinden ayrılarak kulanılabilirlik durumlarına göre yeniden bir elektronik cihazda kullanılabilir veya geri kazanım sürecinde değerlendirilebilir [UğurMetal, 2011].

Nihai ayırma, sökme işlemi sonrası elde edilen ürün, boyut küçültme amacıyla kırma ünitesine gönderilir. Geri kazanım için uygulanacak yönteme göre boyut küçültmenin gerekliliği ve derecesi değişebilmektedir. [Yazıcı ve Deveci, 2009]

Ön hazırlık işlemleri geri kazanım öncesi verimliliğin arttırılması ve geri kazanım sürecini olumsuz etkilememesi için son derece önemli bir süreçtir. Ülkemizdeki mevcut toplama ve ayrıştırma tesisleri Şekil 3.2 deki gibi sınıflandırma işlemini gerçekleştirmektedir. Sınıflandırma sonucundaki malzemeler geri kazanım tesislerindeki işlemler sonucunda tekrar kullanılmak üzere üretime kazandırılır.

Ülkemizde AEEE işleme tesisleri için Çevre ve Orman bakanlığından yayınlanan 24 Haziran 2010 genelgesindeki standartlara sahip atık elektrikli ve elektronik ayrıştırma tesislerinde toplama, ayrıştırma ve işleme gerçekleştirilir.



Şekil 3.2. Elektrikli ve Elektronik Ekipmanların Fiziksel Ayıştırılması [He et al, 2006]

3.3. Fiziksel Yöntemler

Bir mamulü oluşturan çeşitli materyallerin kimyasal yapılarını bozmadan endüstrinin ihtiyacı olan en uygun hammadde haline getirmek ve ekonomik değeri olan materyalleri ekonomik olmayan materyallerden ayırmak için farklı birçok mekanik ve

fiziksel geri dönüşüm işlemleri uygulanır. Mekanik ve fiziksel ayırma yöntemleri diğer sayılan yöntemlere göre birim başına sabit yatırım ve enerji sarfiyatı daha düşük olması nedeniyle ön plana çıkmaktadır [Tuncuk ve ark, 2011]. Ayrıca mekanik ve fiziksel geri dönüşüm yöntemlerinde ayırma işlemleri için pahalı kimyasallar ve teknikler gerekmemekte, çevre kirlenmesi yönünden daha uygun bir atık oluşmaktadır [Çığgın, 2006].

E-atıkların farklı fiziksel özelliklere sahip çok sayıda malzemelerden oluşması, bu farklılıklardan yararlanarak metal ve plastiklerin ayrılmasını mümkün kılabilmektedir [Cui and Forssberg, 2003]. E-atıklardan metallerin geri kazanımı amacıyla farklı araştırmacılar özgül ağırlık, manyetik, elektrostatik, havalı sınıflandırıcı ve eddy current gibi fiziksel ayırma yöntemlerini uygulamışlardır [Yazıcı ve Deveci, 2009].

Sahip olduğu önemli dezavantajlar (metal/değerli metal kaybı) nedeniyle fiziksel yöntemlerin, genellikle ekstraktif metalurjik işlemler öncesi sadece ön ayırma/zenginleştirme yöntemi olarak kullanılır. Elde edilen ön metal konsantresi hidrometalurjik, biyohidrometalurjik veya pirometalurjik süreçlerle değerlendirilerek daha yüksek metal kazanma verimlerine ulaşılır. Metalik olmayan kısımların ve hatta bazı metallerin (manyetik özelliğe sahip metallerin), nispeten maliyeti düşük olan fiziksel yöntemlerle ile ayrılması, genel olarak daha pahalı yöntemler olan pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemlerin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilirliğini gelişen teknoloji ile beraber arttırmaktadır. [Yazıcı ve Deveci, 2009].

Çizelge 3.3. Materyal Özellikleri ve Fiziksel Ayırma Yöntemleri [Çığgın, 2006]

Materyal Özellikleri	**Ayırma Yöntemleri**
Sertlik, gevreklik, yapı ve kırılış şekli	Boyut küçültme, boyuta göre ayırma
Renk ve parlaklık, Floresan	Elle ve otomatik ayıklama
Özgül ağırlık	Özgül ağırlık (gravite) farkına göre ayırma
Manyetik duyarlılık	Manyetik ayırma
Elektrik iletkenliği	Elektrik iletkenliği farkına göre ayırma

3.3.1. Boyut Küçültme

Bir cismin kırma ve öğütme işlemleriyle kendinden daha küçük parçalar haline getirilmesi işlemine boyut küçültme denir [Kaytaz, 1990]. Boyut küçültme işlemleri için kabul edilmiş olan belirli bir sınıflandırma yoktur ancak boyutları 200 – 10 cm arasındaki tanelere uygulanan kırma işlemleri iri kırma, 10 – 0,5 cm arasındaki tanelere uygulanan kırma işlemleri ise ince kırma olarak tanımlanabilir. Kırma işlemlerinde kullanılan araçlara kırıcı, öğütme işlemlerinde kullanılan araçlara ise öğütücü veya değirmen adı verilir [Kaytaz, 1990] [Önal ve Ateşok, 1994].

3.3.2. Boyut Farkına Göre Ayırma

Çeşitli tanelerin karışımından oluşan bir materyalde taneleri büyüklüklerine göre birbirinden ayırmaya boyuta göre ayırma denir. Eleme ve sınıflandırma olarak iki şekilde yapılır [Kaytaz, 1990].

3.3.2.1. Eleme

Eleme, tanelerin belirli büyüklükteki delik veya açıklıklardan geçebilme veya geçememe özelliğine dayanarak yapılan bir boyuta göre ayırma işlemidir. Elek çeşitleri elek yüzeyinin yapısına göre ve eleğin çalışma şekline göre ikiye ayrılır. Elek yüzeyinin yapısına göre saç elekler, paralel çubuklu, yel örgü elekler olmak üzere sınıflandırılır. Eleğin çalışma şekline göre hareketsiz elekler (sabit kavisli elek, sabit ızgara elekler) , hareketli elekler (hareketli ızgara, sallantılı elekler, titreşimli elekler, döner elek tromerler) kullanılır [Çığgın, 2006].

3.3.2.2. Sınıflandırma

Taneler Arasında boyut, özgül ağırlık veya şekil farkı olan, durgun veya hareketli su veya hava gibi bir ortamda farklı hızlarla çökmelerinden (terminal hız) yararlanılarak birbirinden ayrılması işlemi sınıflandırma olarak tanımlanır. Sınıflandırıcılar yapıları ve çalışma şekilleri bakımından çok çeşitlidirler. Başlıca sınıflandırıcı çeşitleri (Çöktürme havuzları, Çöktürme konileri, Hidrolik sınıflandırıcılar, Spiral) sınıflandırıcılar, Siklonlar, Havalı sınıflandırıcılar kullanılır.

3.3.3. Özgül Ağırlık Farkına Göre Ayırma

Materyal tanelerinin akışkan bir ortam içinde özgül ağırlık farkından dolayı değişik şekilde hareket ederek birbirlerinden ayrılması ile gerçekleştirilen ayırma işlemine özgül ağırlık (gravite) farkına göre ayırma adı verilir [Çığgın, 2006].

E-atıklar, özgül ağırlığı birbirinden farklı birçok madde (metaller, plastikler vb.) içermektedir. Bu özgül ağırlığı farkından yararlanarak metal ve plastikler birbirinden ayrılabilmektedir [Yazıcı ve Deveci, 2009].

3.3.4. Manyetik Ayırma

Farklı manyetik duyarlıktaki bireysel materyal tanelerinin, uygun bir manyetik alan içinde, başlıca manyetik kuvvet olmak üzere, çeşitli kuvvetlerin (yerçekimi, sürtünme vb.) bileşik etkileri nedeniyle birbirinden ayrılması yoluyla gerçekleştirilen ayırma işlemine manyetik ayırma adı verilir [Çığgın, 2006].

Düşük alan şiddetli kuru manyetik ayırıcılar genellikle e-atık içindeki demir veya demir içeren maddelerin ayrılması amacıyla kullanılmaktadır. Ayırma sonucu elde edilen demir dışındaki malzemeler genellikle iletkenlik özelliklerine göre ayırmaya tabi tutulmaktadır [Yazıcı ve Deveci, 2009].

3.3.5. Elektrik İletkenliği Farkına Göre Ayırma

Elektrik iletkenliği ile ayırma yöntemlerinde materyaller elektrik iletkenliği (veya direnci) farklılığına göre birbirinden ayrılır. Üç tipik elektrik iletkenliği ayırma tekniği mevcuttur; elektrostatik ayırma, girdap akımı ayırma ve triboelektrik ayırma [Cui and Forssberg, 2003].

3.3.5.1. Elektrostatik Ayırma

İletkenlik farkına dayanarak yüksek gerilim altında yapılan ve materyal tanelerinin kuru olarak ayrılması işlemine elektrostatik ayırma veya yüksek gerilim ayırması adı verilir [Kaytaz, 1990]. Esas olarak elektrostatik kuvvetlere dayanan

elektrostatik ayırmada, materyallerin yüksek gerilim altında statik bir elektrik yükü kazanıp bu yükü bir süre depo etme özelliğinden yararlanılmaktadır [Çığgın, 2006].

3.3.5.2. Girdap Akımı Ayırma

Kaba boyutlu parçaların el ile beslenmesi için uygun olan girdap akımı ayırıcıları günümüzde neredeyse tamamen atık ıslahı için kullanılmaktadır. Manyetik ve manyetik olmayan metallerin ayrılmasında yüksek verimle çalışan bu sistem atık geri dönüşüm çalışmalarında en önemli gelişmelerin başında yer almaktadır. Eddy current ayırma ise genellikle atıklardan demir dışı metallerin (özellikle Al gibi) kazanılmasında kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, iri tane boyutlarında (>5 mm) daha etkindir [Çığgın, 2006].

3.3.5.3. Triboelektrik Ayırma

Farklı tip plastiklerin tane özellikleri çok benzer olduğundan plastiklerin ayrılması sorun teşkil etmektedir. Triboelektrik ayırma plastiklerin sahip oldukları elektriksel özellikleri arasındaki farka göre tasnif edilmesini mümkün kılar. Metal ve özellikle değerli metal (Au gibi) kaybının temel sebebinin metal-plastik ara yüzeylerinin varlığı olduğu farklı araştırmacılar tarafından bildirilmiştir. Ayrıca, metal ve metal olmayan kısımların serbestleşme boyutunun küçük olması durumunda metal kazanma verimlerinin düşük olmasının bir diğer nedeni de genel olarak ince tane boyutlarında fiziksel ayırma yöntemlerinin etkinliklerinin düşük olmasıdır.

Çizelge 3.4. Elektrik ve Manyetik özelliklerinden faydalanan ayırma yöntemleri [Yazıcı ve Deveci, 2009]

Yöntem	Ayırma kriteri	Ayırmanın Temelleri	Malzeme Türü	Ayırma Tane
Manyetik ayırma	Manyetik duyarlılık	Farklı manyetik duyarlılığa sahip malzemeler bir manyetik alan içinde farklı kuvvetlere maruz kalırlar	Demir/demirli malzeme/ferro manyetider ile diyamanyetik maddelerin ayrılmasında	<5 mm
Elektrostatik ayırma (Korona)	Elektrik iletkenliği	Olgun elektrik alanın etkisiyle taneler farklı yükler kazanır ve böylece farklı kuvvetlerden etkilenirler	Metal-ametal ayırmasında	0,1 – 5 mm (tabakalı taneler için 10mm)
Elektrostatik ayırma (Triboelektrik)	Dielektrik sabiti	Farklı malzemeler temas etkilerinde zıt yüklerle (+ veya -) yüklenerek farklı kuvvetlere maruz kalırlar.	Plastik-Plastik ayırmasında	<5-10 mm
Eddy current ayırma	Elektrik iletkenliği ve yoğunluk	İletken taneler değişken bir manyetik alana girdiklerine eddy current akımları oluşur ve bu da zıt yönde itici bir manyetik alan oluşmasını sağlar.	Demir dışı metal – ametal ayırmasında	>5 mm

3.4. Hidrometalurjik ve Biyohidrometalurjik Yöntemler

Hidrometalurjik prosesler asit, alkali gibi liç çözeltilerinde metal içeriğinin çözülmesi esasına dayanır [Kinoshita, 2003]. Hidrometalurjik yöntem, Pirometalurjik yöntemlerle karşılaştırıldığında ilk yatırm maliyetleri düşük, çevresel etkisi az, metal kazanma verimi yüksek [Goosey and Keilner, 2002] ve nispeten küçük ölçekli daha kolay kontrol edilebilen uygulamalar için daha uygun yöntemlerdir [Yang et al, 2011]. Ayrıca hidrometalurjik süreçlerde, fiziksel yöntemler kullanıldığında oluşan metal kayıpları da (%10-35) en aza inmektedir**.** Bu nedenlerden dolayı, E-atıklardan metallerin kazanımında hidrometalurjik yöntemler önemli bir potansiyele sahiptir [Goosey and Keilner, 2002]. Biyohidrometalurjik yöntemler ise asidofilik bakteriler gibi çeşitli mikroorganizmaların kullanıldığı, esas olarak hidrometalurjik yöntemlerdir. Elektronik atıklardan metallerin geri kazanımı için uygun hidrometalurjik ve biyohidrometalurjik yöntemlerin seçilmesinde ve geliştirilmesinde en önemli konulardan birisi, metallerin E-atıklarda, metalik ve alaşım halinde bulunmasıdır. Bu nedenle, metallerin çözünme sürecinde liç ortamının oksitleyici bir karakterde olması veya oksitleyici reaktif varlığında liç işleminin yapılması gereklidir [Yazıcı ve Deveci, 2009].

3.4.1. Liç Prosesi

Cevherler, yan ürün ve atıklardan metallerin hidrometalurjik proseslerle kazanılması için uygulanan liç prosesleri, heterojen bir proses olup heterojen faz, sıvı bir liç reaktifi ve bir katıdan meydana gelir. Liç olayı sırasında katı madde bünyesinde bulunan reaktanların sıvı faza taşınması söz konusudur. Liç işlemi uygulanış biçimine ve liç işleminde oluşan reaksiyonlara göre sınıflandırılır.

- Karıştırmalı liç
- Perkolasyon ve tank liçi
- Yığın liçi
- Yerinde liç
- Yükseltgen olmayan liç prosesler
- Yükseltgen liç prosesleri

Karıştırmalı liç işleminde, besleme malzemesinin genellikle 0,5 mm tane büyüklüğüne indirilmesine takiben uygun bir çözücü ile 40-70 katı içerecek şekilde hazırlanan karışımlar yeterince çözünme sağlanana kadar karıştırma işlemine tabi tutulurlar. Pekolasyon veya tank işleminde düşük tenörlü, iri ve mümkün olduğunca homojen tane boyutunda gözenekli ve geçirgen malzemeler için uygun, bir araya geldiği zaman geçirimsiz bir kütle oluşturan malzemeler için ise uygun değildir. Yığın liç işleminde geçirimsiz bir zemin üzerinde hazırlanmış bir yığın üzerine boru ağı, çözelti havuzu, fiskeleyeme sistemleri ile çözücü gönderilerek arazide değerli bileşenin kazanılmasına yönelik uygulamalardır. Yerinde liç, doğrudan derinde ve yüzeyde oluşmuş düşük tenörlü cevher yataklarında veya terk edilmiş maden ocaklarında gerçekleştirilen bir işlemdir. Liç prosesleri ayrıca yükseltgeyici ortam gerektiren ve gerektirmeyen prosesler olarak iki kısımda incelemek mümkündür. İki yöntem arasındaki fark, liç edilecek metalin yükseltgen bir reaksiyonla çözeltiye alınıp alınmadığı ile ilgilidir. Yükseltme reaksiyonlarında en fazla kullanılan etken oksijen ve demir(III) tuzlarıdır [Boyrazlı, 2001].

3.5. Pirometalurjik Yöntemler

Pirometalurjik yöntem atık elektrikli ve elektronik eşyalardan değerli metal ve temel metallerin geri kazanımı sağlayan geleneksel yöntemdir [Tuncuk ve ark 2011]. Pirometalurjik yöntemler biyometalurjik ve hidrometalurjik yöntemlerle karşılaştırıldığında kontrolü daha zor ve daha az esnek yöntemlerdir [Yazıcı ve Deveci, 2009].

Pirometalurjik proses, bakır ve değerli metal geri kazanımında etkili bir işleme yöntemidir. Bu yüzden atıklar yaygın olarak pirometalurjik (bakır ergitme) tesislerinde değerlendirilmektedir [Yang et al, 2011]. Metal ve değerli metaller genellikle baskılı devre kartları, röle, konektör ve entegre devrelerde önemli miktarlarda bulunduğu için ergitme tesisleri bu tür atıklara yönelir [Yazıcı ve Deveci, 2009]. Ergitme işlemleri sırasında bazı çevresel ve teknik sorunlarla da karşılaşılmaktadır [Yang et al, 2011]. Atık baskılı devre kartları bakır ergitme tesislerine beslendiğinde, kartların içeriğindeki organik maddelerin özellikle klorlu/bromlu alev geciktiriciler yanması sonucu, çevresel açıdan zararlı dioksinler ve furanlar (poliklorinli organik bileşikler) oluşmaktadır

[Tuncuk ve ark 2011]. E-atıklar içindeki plastikler ergitme sırasında indirgeyici veya yakıt olarak işlev görmektedir. Fakat devre kartlarındaki plastik malzemeler, içerdikleri halojenler ve sahip oldukları düşük yanma ısıları sebebiyle yüksek kaliteli yakıt olarak nitelendirilmemektedir. Yanmayı sağlamak için mutlaka yanma ısısı yüksek yakıta ihtiyaç duyulmaktadır**.** Ergitme işlemi sırasında bazı metaller buharlaşarak süreçten uzaklaşabilmektedir. Elektronik atıklarda bulunan silisyum ise ergitme sonucu oluşan cüruf miktarını arttırmakta ve metal/değerli metal kaybını yükseltebilmektedir [Yazıcı ve Deveci, 2009].

Çizelge 3.5'de Elektronik atıklardan metallerin geri kazanımı için uygulanabilecek yöntemlerin karşılaştırılması verilmektedir. Geri kazanımda uygulanan 4 yöntemin avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Dünyada artan E-atık miktarı, gelişen teknoloji ile birlikte kullanılan yöntem ve proseslerde değişiklik göstermektedir. Tüm E-atıkların geri kazanımında uygulanan ilk proses olan fiziksel yöntemleri, belirli avantaj ve dezavantajlara sahip hidrometalurjik, biyometalurjik, pirometalurjik yöntemler takip etmektedir.

Çizelge 3.5. E-atıklardan Metallerin Geri kazanımı için uygulanabilecek yöntemlerin karşılaştırılması [Yazıcı ve Deveci, 2009]

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
Fiziksel Yöntemler	Tüm e-atık çeşitleri için uygundur	Metal / Değerli metal kaybı yüksek
	Zararlı gaz çıkışı yoktur	Elde edilen ürünün ekstraktif metalürjik işlemlere (liç, ergitme) tabi tutulması gerekir.
	Basit proseslerdir	Toz problemi var
Hidrometalurjik Yöntemler	Küçük ölçekte uygulanabilir	Ön hazırlık işlemi gerektiriyor
	Daha esnek	
	Metal kazanma verimi yüksek	Atık çözeltilerin arıtılması gerekli
	Yüksek saflıkta ürün eldesi	
	Çevresel etkisi düşük	Yan ürün eldesi zor
	Zararlı gaz çıkışı yok	
Biyohidrometalurjik Yöntemler	Küçük kapasiteli, küçük ölçekli işletmeler için	Liç süresi uzun (günler) , Metallerin toksik etkisi liç işlemini olumsuz etkiler
	Çevresel etkisi düşük	
	Zararlı gaz çıkışı yok	Liç için katı oranı nispeten düşük (<%20)
	Toz problemi yok	
Pirometalurjik Yöntemler	Çoğu E-atık türü için uygun	Sadece değerli metal içeriği yüksek atıklar için ekonomik, E-atık içindeki seramik ve cam malzemeler cüruf miktarını arttırıyor ve bu da metal değerli etal kaybını yükseltiyor
	Bazı E-atık türleri için boyut küçültme aşaması gerekli değil	Al ve Zn kazanımı mümkün değil, Metal olmayan ksımların kazanımı mümkün değil
	Plastikler ergitme işleminde enerji kaynağı olarak işlev görebilir.	Pahalı ve enerji yoğun bir işlem, Zararlı gaz çıkışı var (dioksinler ve furanlar)

3.6. Türkiye'de Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya İşleme Tesisleri

3.6.1. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya İşleme Tesisleri

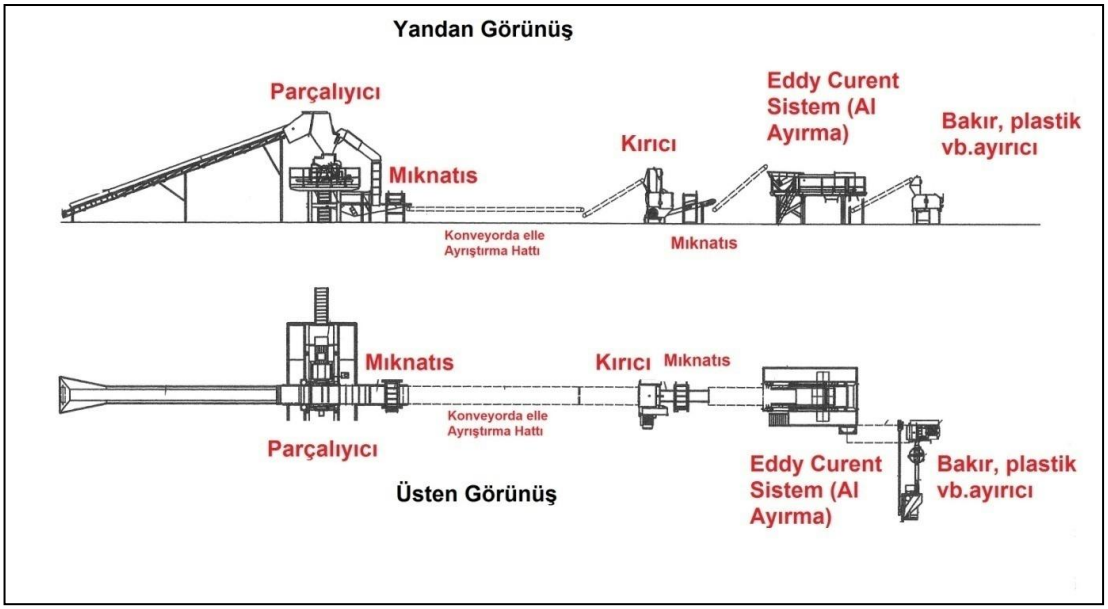
Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Elektrikli ve Elektronik atıkların işlenmesi, sınıflandırma ve bertarafının sağlanması için uygunluk belgesine sahip tesislere fiziki şartlar getirmiştir. Bu şartları sağlayan uygunluk belgesine sahip geri dönüşüm firmaları tehlikeli maddeleri toprak ve su ile temasını engelleyip kontamine hale gelmesini önler.

Günümüzde hızla artan elektronik ekipmanların tehlike ihtiva eden parçaları uygunluk belgesine sahip tesislerde eğitimli personeller tarafından uygun bertaraf tesislerine gönderilir. Ön işlem yapan bu tesisler yurt içinde geri kazanım yapan tesislere (Alüminyum, Demir, Ambalaj) tedarik sağlar. Elektronik atıklardaki değerli metallerin kazanımı ise yurt dışında pirometalurjik, biyo/hidrometalurjik yöntemler uygulayan tesislere gönderilir. Ülkemizdeki işleme tesislerin ana amacı bertaraf parçaları arasında gösterilen kondansatör, cıva içeren tüp, fosfor, kontamine ekipmanları bertaraf tesislerine bunun dışındaki geri kazanım/dönüşümü mümkün malzemeleri ise en az kayıpla yurt içi ve yurt dışındaki tesislerde değerlendirmek. Bu kapsamda hem insan ve çevre sağlığını tehdit eden tehlikeli maddelerin uygun koşullarda işlenmesi sağlanır hem de Dünya rezervleri gün geçtikçe azalan Altın, Paladyum, Platinyum, Rodyum vb. Elementlerin geri kazanımı ile ülke ekonomisine katkı sağlar.

Ülkemizde atık elektrikli ve elektronik eşya işleme kapsamında faaliyet gösteren 17 lisanslı firma mevcuttur[AYDB]. Ülkemizde faaliyet gösteren işleme tesisleri fiziksel yöntemler kullanarak atık elektrikli ve elektronik malzemeleri halk sağlığına ve çevreye zarar vermeden geçici olarak saha içinde depolamayı, söküm (kırma) , ayrıştırma ve sınıflandırma işlemlerini gerçekleştirerek geri dönüşüm/geri kazanım düzeyinin mümkün olan atıkları ülke ekonomisine kazandırmayı hedefler. Metal kayıpların önlenmesi, tehlikeli atıkların değerli metaller ile kontamine olmamasını sağlayan bu yöntem yurt dışındaki geri kazanım tesislerine

gönderilmeden önce malzemenin sınıflandırılmasını sağlayan önemli bir prosestir. Fiziksel yöntemler ile metallerin sınıflandırılması işlemlerini elle ayırma yöntemi veya otomasyon ile iki şekilde sağlanır. Geleneksel yöntem olan elle ayrıştırmada metal, plastik, cam, tehlikeli maddeler birbirinden ayrıştırılır. Elle ayrıştırmanın avantajı makine sistemleri öncesi tehlikeli maddelerin ayrılması ve ilk sınıflandırma imkanı sağlar.

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte artan elektronik atıkların fiziksel ayrışmasında makine sistemleri entegre olmuştur. Bu sistemler ile saatlik elektronik atık ayrıştırma kapasitesi artmakta ve ayrıştırma oranı %95 üzerinde verimlere ulaşmaktadır.



Şekil 3.3. Elektrikli ve Elektronik Atık Ayrıştırma Tesis Bileşenlerinin Üsten Ve Yandan Gösterimi

Bu yöntem ile parçalayıcıdan geçirilen elektrikli ve elektronik atık konveyör üzerindeki mıknatıs ile manyetik özellikten yararlanarak demir ve bileşenleri ayrıştırılır. Konveyör üzerinde devam eden alüminyum, plastik ve bakır içeren malzemeler tekrar kırıcı sisteme beslenir. Kırıcı işlemi sonrası Eddy curent yönteminde ise elektriksel iletkenlik kullanılarak alüminyumun sistemden ayrılmasını sağlar. Proses sonunda kurulan elek ve hava akımı ile yoğunluk fark yönteminden yararlanarak bakır ve plastik malzemelerin yüksek verimde ayrılması ile işlem tamamlanır [Uğur Metal, 2011].

4. YANIT YÜZEY METODOLOJİSİ

Deney tasarım yöntemleri, bilimsel araştırmalarda ve endüstride birçok farklı amaçla kullanılırlar. Deney tasarımında temel amaç, yanıt bağımlı değişkenine etkisi olabileceği düşünülen bağımsız değişken faktörlerinin dikkate alınması ve böylelikle gerçek-tahmin hatasının minimuma indirilmesidir [Ünsal, 2010].

Optimizasyon, prosesin belirlenen hedefler (yanıtlar) doğrultusunda, bağımsız değişkenlerin birbirleriyle olan etkileşimleri ve bu bağımsız değişkenlerin hedefe (yanıta) olan etkileri de göz önünde bulundurularak bir araya getirilip uygulanması işlemidir [Koç ve Ertekin, 2009]. Optimizasyon proses tasarımlarını verimli hale getirmek, üretimi ve kaliteyi iyileştirmek ve maliyeti minimize etmek için kullanılmaktadır.

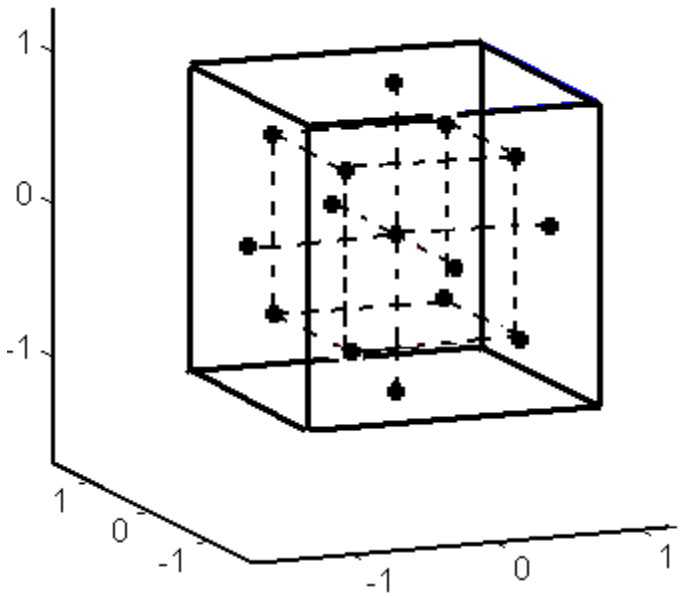
Yanıt Yüzey Metodolojisi, istenilen yanıt için değişkenlerin optimum şartlarını seçmeyi, değişkenler arası etkileşmeyi tespit etmeyi, model denklemin oluşturulmasını ve faktörlerin ölçülmesini sağlamaktadır. Yanıt Yüzey Metodolojisi, faktöriyel tasarımı ve regresyon analizini içermektedir [Ünsal, 2010].

Yanıt yüzey yöntemi, “Denemelerin Optimum Koşullara Ulaşması” ismi ile 1951 yılında Box and Wilson tarafından geliştirilmiş ve tanımlanmıştır [Turan ve Altundoğan, 2011]. İlk olarak kimya endüstrisine uygulanmıştır. Myers ve Montgomery yanıt yüzey yöntemini, proseslerin geliştirilmesi ve optimizasyonu için gerekli istatistiksel ve matematiksel tekniklerin birlikte kullanıldığı bir yöntem olarak tanımlamıştır. Yanıt yüzey yöntemi, proses değişkenlerinin deneysel uzayını araştırmak için deneysel stratejileri, sistemin yanıtı ve üzerinde etkili olan bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan empirik modelleme tekniklerini ve proses değişkenlerinin sistemin yanıtında arzu edilen etkiyi gösterdiği seviyelerinin bulunması için kullanılan optimizasyon tekniklerini içermektedir

Genel olarak yanıt yüzey yöntemi 3 aşamadan (eleme denemeleri, bölge araştırması ve işlemin veya ürünün optimizasyonu) oluşmaktadır. Eleme denemeleri, daha az sayıda ve daha verimli esas deneme yapılmasına olanak sağlamaktadır. İkinci aşama olan bölge araştırmasında amaç, eleme denemeleri ile belirlenen

bağımsız değişkenlerin sistemin yanıtında oluşturdukları değerlerin, optimum noktaya yakın sonuçlar verip vermediğini belirlemektir. Yanıt yüzey yönteminin üçüncü aşaması, işlem optimum noktaya yaklaşıldığında başlar. Gerçek yanıt fonksiyonu optimum nokta etrafında önemli bir eğrilik göstermektedir. Bu eğriliğin tahminlenmesinde lineer olmayan modeller, genellikle ikinci dereceden polinomiyal modeller, üssel modeller veya eksponensiyel modeller kullanılır. Uygun bir model elde edildikten sonra, bu model optimum noktanın araştırılmasında kullanılır [Koç ve Ertekin, 2009].

Yüzey merkezcil deney tasarımında (Face Centered Design) = 1'dir. Tasarım merkezi ise (0, 0, 0) koordinatlarına sahip merkez noktasıdır. Bu deney tasarımında, yıldız noktalar küpün yüzlerinin tam ortasında yer almaktadır. Şekil 4.1'de üç faktörlü bir sistem için merkezcil bileşik deney tasarımı görülmektedir [Ünsal, 2010].



Şekil 4.1. Üç faktörlü bir sistem için merkezcil bileşik deney dizaynı

4.1. Yanıt Yüzey Modelinin Oluşturulması

Birçok yanıt yüzey yöntemi probleminde, yanıt ve bağımsız değişken arasındaki fonksiyonun matematiksel formu genellikle bilinmediğinden tahminlenmesi gerekmektedir. Sistemin yanıtı, bağımsız değişkenin bir lineer fonksiyonu olarak iyi bir uyum veriyorsa, birinci dereceden polinomiyal denklem,

model olarak kullanılabilir. Eğer sistemin yanıt yüzeyinde bir eğrilik varsa, ikinci dereceden polinomiyal denklemler gibi daha yüksek dereceli polinomiyal denklemler kullanılmalıdır [Koç ve Ertekin, 2009].

Yanıt yüzey yöntemi uygulaması için üretilmiş çoğu paket program ikinci dereceden polinomiyal modeli kullanmaktadır (Eşitlik 4.1). İkinci dereceden polinomiyal bir modelin sadece bir tane bölgesel minimum veya bölgesel maksimum noktası olduğu için optimizasyon çalışmasında ikinci dereceden polinomiyal bir model kullanımı kolay bir yaklaşımdır. Eğer ikinci dereceden bir modele uygun değilse yanıtın veya bağımsız değişkenlerin transformasyonu yapılarak veya bağımsız değişkenlerin aralıkları uygun bir şekilde değiştirilerek yanıtın eğiliminin bu model ile açıklanması sağlanmalıdır (Eşitlik 4.2). Üssel (Power) modeller de polinomiyal modellere benzeyen empirik modellerdir ve polinomiyal modellerin bazı dezavantajlarını elimine ederler.

$$y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^{m} \beta_i \; X_i^{ri} \tag{4.1}$$

$$y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^{m} \beta_i \; (X_i - X_{0,i})^{\,ri} \tag{4.2}$$

Üs γ_i' nin negatif olması ters terimleri oluşturur ve bu durum yanıttaki pik ile temsil edilir. Üssel model kullanılarak tahminlenen yanıtların bazı durumlarda transformasyonun deneysel verilerin temsilini iyileştirdiği rapor edilmiştir.
Yanıtların tahminlenmesinde kullanılan üstel eşitlikler aşağıda belirtilmiştir (Eşitlik 4.3). Birden fazla bağımsız değişken içeren üstel modeller yanıta logaritma dönüşümü yapıldıktan sonra kullanılabilmektedir (Eşitlik 4.4).

$$y = \beta_0 \left(1 - e^{(-B_1 x_1)}\right) \tag{4.3}$$

$$\log\left[\frac{y_0 - y_i}{y_i}\right] = \beta_0 + \sum_{i=1}^{m} \beta_i \, x_i \tag{4.4}$$

4.2. Model Parametrelerin Tahminlenmesi

Çok yaygın olarak kullanılan lineer regresyon analizi, bağımlı değişken (yanıt) ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi fonksiyonel olarak inceleyen istatistiksel bir tekniktir. Polinomiyal modeller gibi lineer olan herhangi bir model, oluşturduğu yanıt yüzeyin şekli ne olursa olsun lineer regresyon modelidir. Çoklu lineer regresyon modelinde, regresyon katsayıları en küçük kareler yöntemi kullanılarak tahminlenmektedir. En küçük kareler yönteminin uygulandığı, yanıt yüzeyin tahminlenmesinde kullanılan ikinci dereceden polinomiyal denklem Eşitlik (4.5)'deki gibidir. En küçük kareler yöntemi uygulanırken; seçilen modelin matematiksel formunun uygun olduğu, dolayısıyla gerçek ortalama yanıtı temsil edebildiği, denemelerde rastgele hatanın (ε) birbirinden bağımsız normal dağılış gösterdiği, ayrıca beklenen değerinin ($E[\varepsilon]=0$), ve varyansının (σ^2) sabit ($Var(\varepsilon)=\sigma^2$), ($\varepsilon \sim N(0,\sigma^2)$) olduğu varsayılmıştır. Rastgele hatanın (ε_i) normal dağılıma sahip olması katsayılar ve regresyon modelinin önemliliği üzerinde yapılan hipotez testlerinin geçerliliği açısından önemlidir [Koç ve Ertekin, 2009].

$$y_i = \beta_0 + \sum_{1 \le j \le m}^{m} \beta_j x_j + \sum_{1 \le j \le k \le m}^{m} \beta_k x_j x_k + \varepsilon_i (i = 1,2,3, \dots, n) \qquad (4.5)$$

Burada, n gözlem sayısını, m bağımsız değişken sayısını, y_i bağımlı değişkenin i'inci gözlem değerini, x_{ij} i'inci gözlemin j'inci bağımsız değişkenini, β'lar tahminlenecek model katsayılarını, ε_i ise i'inci gözlemdeki rastgele hatayı ifade etmektedir.

4.3. Model Uygunluğunun Test Edilmesi

Regresyon modeli tahminlendikten sonra bu denklemin ilişkiyi ne derece açıkladığının ve bu denklemi kullanarak yapılacak tahminlerin ne derece hassas olacağının araştırılması gerekmektedir. Yapılan varsayımlardan biri olan, seçilen modelin matematiksel formunun uygun olduğu, dolayısıyla gerçek ortalama yanıtı temsil edebildiği de test edilmelidir.

4.4. Model Uygunsuzluğu Testi

Yanıt yüzey yönteminde, tasarım edilmiş denemelerden alınan veriler, regresyon modeline fit ettirilmektedir. Elde edilen bu model gerçek yanıt fonksiyonuna sadece bir yaklaşım olduğu için, tahminlenen değerler ile deneysel veriler arasındaki fark (kalıntı), sadece saf deneysel hatayı değil modelin matematiksel formunun uygunsuzluğundan kaynaklanan hatayı da içermektedir.

4.5. Optimizasyon

Proseslerin optimizasyonunda genellikle sistemin performansını veya ürünün kalite kriterlerini belirleyen çok sayıda yanıtla eş zamanlı olarak çalışılır. Bu yanıtların bazılarının maksimum seviyede tutulması, bazılarının minimum seviyede tutulması, bazılarının da kabul edilebilir değerler veya hedef değer alması istenir. Tek yanıtlı optimizasyon problemlerinin çözümü durağan noktaların hesaplanması ile yapılabilir. Durağan noktaların hesaplanması 2 yolla yapılır. Model içinde yer alan bağımsız değişkenlerin her biri için kısmi türevler alınarak sıfıra eşitlenir ve denklem sistemi çözülür. Her bağımsız değişken için elde edilen değerler modelde yerlerine konarak durağan noktalar için yanıt hesaplanır. Matris yardımı ile de durağan noktaların hesaplanması yapılabilmektedir. Modelin matris gösterimi aşağıdaki eşitlik deki gibidir.

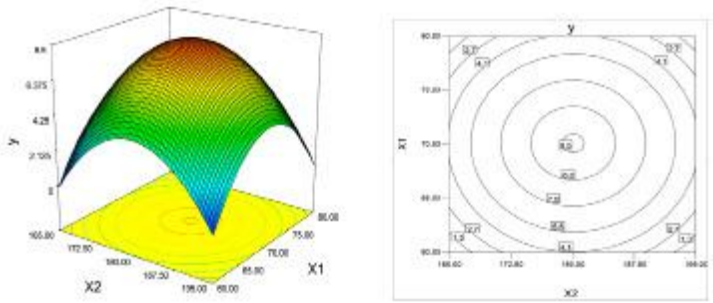
$$\mathrm{Y} = b_0 + x^1 b + x^1 B_x \tag{4.6}$$

Burada b_0 model sabitini, b doğrusal ve B ise ikinci dereceden model katsayılarının tahmin edilebilirliği göstermektedir. Ayrıca $x_1=(x_1.....x_m)$'dir. B k x k boyutlu simetrik matristir. Durağan noktalar aşağıdaki eşitlik den elde edilmektedir

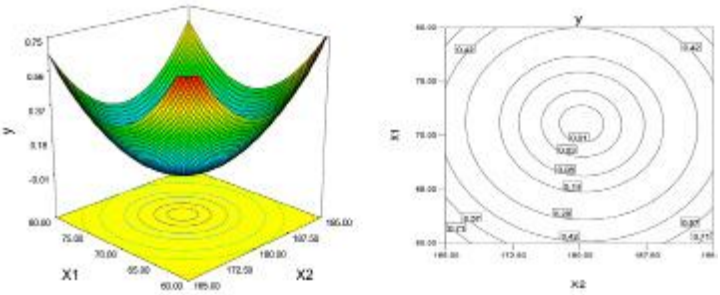
$$x = \frac{1}{2} B^{-1} \mathrm{b} \tag{4.7}$$

Yanıtların izohips eğrilerinin çizilerek üst üste yerleştirilmesi (superimposing), çok yanıtlı optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan diğer bir yaklaşımdır. Her bir izohips eğrisi, bir bağımsız değişken merkezdeyken,

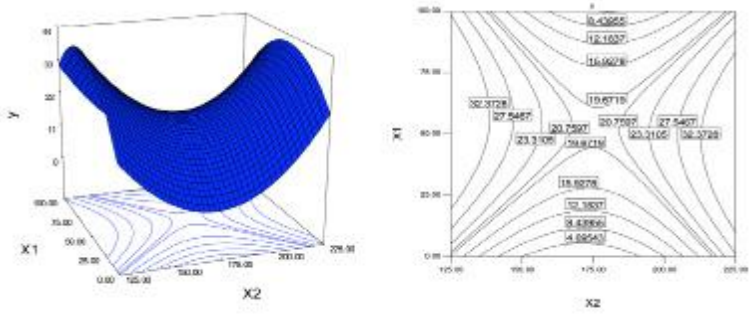
diğer iki değişkenin sonsuz sayıdaki kombinasyonlarını vermektedir. Katsayılara bağlı olarak izohips eğrilerinin dairesel, eliptik ya da eğer şeklinde olması; maksimum nokta, minimum nokta, (eyer noktası (saddle point)) durgun tepe ya da yükselen/azalan tepe koşularını verebilmektedir. Maksimum nokta, minimum nokta ve eğer noktası için yanıt yüzey grafikleri ve izohips eğrileri sırasıyla Şekil 4.2 a, b ve c'de gösterilmiştir. Yanıt yüzeyinin dairesel olması, değişkenler arasındaki etkileşimin ihmal edilebilir olduğunu, elips ya da eyer şeklindeki yüzeyler iç etkileşimin önemli olduğunu göstermektedir. En küçük elips ya da dairesel şekil ile sınırlandırılmış yüzey öngörülen en yüksek veya en düşük yanıtı belirtmektedir.



Şekil 4.2 (a) Maksimum nokta için yanıt yüzey grafiği ve izohips eğrileri



Şekil 4.2(b) Minimum nokta için yanıt yüzey grafiği ve izohips eğrileri



Şekil 4.2 (c) Eyer noktası için yanıt yüzey grafiği ve izohips eğrileri

4.6. İstenilen Hedefe Ulaşma Fonksiyonu Yaklaşımı

İstenilen hedefe ulaşma fonksiyonun ilkesi, tüm yanıtların, boyutsuz istenilen hedefe ulaşma ölçeğini içeren "istenilen hedefe ulaşma fonksiyonu" olarak tanımlanan tek bir fonksiyon altında toplanmasını ve bu fonksiyonun arzu edilen sonuçları verecek şekilde maksimize edilmesini içermektedir. Farklı ölçeğe sahip yanıtların birlikte incelenebilmesi, yanıtların tek bir fonksiyona kolayca dönüştürülebilmesi ve kalitatif ve kantitatif yanıtların kullanılabilmesi bu yöntemin önemli avantajları arasındadır. İstenilen hedefe ulaşma fonksiyonu, tüm yanıtların bir araya getirildiği, 0 ile 1 arasında değişen tek bir yanıt indeksidir ve bu değerin 1'e yaklaşması araştırmacının belirlediği kriterlerin sağlandığını belirtmektedir. İstenilen hedefe ulaşma fonksiyonu $d_i(y_i)$'ler her bir yanıt (y_i) için ayrı ayrı hesaplanır ve daha sonra bu bireysel fonksiyonların geometrik ortalaması alınarak tek bir toplu istenilen hedefe ulaşma fonksiyonu *D* oluşturulur (Eşitlik 4.8).

$$d_i(y_i)=\begin{bmatrix} 0 & y_i\,(x)\langle\, L_i \\ \left(\frac{y_i(x)-L_i}{T_i-L_i}\right)^s & L_i \le y_i\,(x) \le T_i \\ \left(\frac{y_i(x)-U_i}{T_i-U_i}\right)^t & T_i \le y_i\,(x) \le U_i \\ 0 & y_i\,(x)\rangle\, L_i \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

Burada, *Ti*, hedef değeri, *Li* ve *Ui* sırasıyla alt ve üst sınırları belirtmektedir. *s* ve *t* ise hedef değere ulaşmanın ne kadar önemli olduğunu ve bu yanıtın ürünün toplam arzu edilebilirliğindeki rolünü belirleyen ağırlık sabitleridir.

Her bir yanıt için hedefe ulaşma fonksiyonları tanımlandıktan sonra geometrik ortalamaları alınarak hepsi için tek bir toplu istenilen hedefe ulaşma fonksiyonu D elde edilir. Ağırlık katsayılarına ilave olarak her bir yanıtın optimizasyondaki önemliliğini belirten 1'den 5'e kadar önemlilik derecesi (v_i) de verilebilmektedir (Eşitlik 4.9). Son toplu cazibe fonksiyonu *i* adet yanıt için,

$$\left(\mathbf{D} = (d_1^{\mathrm{v}_1}\, x d_2^{\mathrm{v}_1}\, x d_3^{\mathrm{v}_1} \wedge x d_n^{\mathrm{v}_1})^{\,1/\sum \mathrm{v}_i} = \prod_{i=1}^{n} d_1^{\mathrm{v}_1}\right)^{1/\sum \mathrm{v}_i} \tag{4.9}$$

olarak elde edilir. Daha sonra toplu istenilen hedefe ulaşma fonksiyonunu maksimize eden *x* değişken seviyesi kombinasyonu bulunur [Ünsal, 2010].

4.7. Yanıt Yüzey Yöntemlerinin Hidrometalurjideki Yeri

Hidrometalurji konularında yapılan çalışmalarda yanıt yüzey yönteminin kullanıldığı Türkçe yazılmış araştırmaların sınırlı olup son yıllarda hidrometalurji alanında yapılan çalışmalarda deneylerin tasarımı ve optimize edilmesinde artış gözlenmiştir. Ayrıca sonuç üzerine etkin olan parametre sayısının fazla olması ve deney sayısının çok olması, parametrelerin inceleme aralığının oldukça geniş olmasından dolayı yanıt yüzey yöntemlerin en fazla biyoteknolojik çalışmalarda kullanıldığı görülmektedir.

Hidrometalurji araştırmalarında yapılan liç deneylerin tasarlanması ve optimizasyonunda etkin olan pek çok parametrenin eş zamanlı olarak incelenmesine olanak sağlamasından dolayı, yanıt yüzey yöntemleri araştırmalarda kullanılmaktadır [Turan ve Altundoğan, 2011].

5.Literatür Çalışmaları

Elektrikli ve elektronik atıklar yüksek teknolojinin hayatımıza getirdiği değerli bir atık türüdür. Elektrikli ve elektronik atıklar içerdikleri metal ve değerli metal miktarlarıyla önemli ekonomik potansiyele sahiptir. Baskı devre kartlarındaki yüksek metal oranları göz önüne alındığında E-atıklar için en uygun seçeneğin, geri kazanım ortaya çıkmaktadır. E–atıkların geri kazanımı amacıyla çeşitli mevcut teknolojiler önerilmekle birlikte uygulanabilir yöntemler araştırılmaya devam etmektedir. Günümüzde gelişen teknolojiyle elektrikli-elektronik cihaz üretiminde kullanılan değerli metal miktarının giderek düşmesi yanında artan elektrikli ve elektronik atık miktarının geri kazanılması için maliyeti daha az yöntemlerin geliştirilmesi gerekir. Bu nedenle yapılan araştırmalarda değerli metal ve temel metallerin düşük maliyet ve yüksek verimde geri kazanılması için geleneksel pirometalurjik yöntemler yerine günümüzde hidrometalurjik yöntemler araştırılmaktadır.

2002 yılında Veglio ve arkadaşları tarafından yapılan elektronik ve galvanik endüstriyel atıklardan değerli metallerin geri kazanım çalışmalarında liç ve elektro kazanım yöntemleri yürütülmüştür. Bakır, nikel, mangan kurşun, kalay'ın Liç işleminde H_2SO_4 kullanılmıştır. Bu çalışmada asit konsantrasyonu, sıcaklık, işlem süresi için optimum şartlar araştırılmış ve Bakır ile Nikel geri kazanımında kg başına 2,13 ve 4,43 kWh enerji tüketilmiştir. Elektro kazanım sonunda % 94-99 Cu ve Ni katot da geri kazanılmıştır [Veglio et al, 2002].

2002 yılında Kinoshita ve arkadaşları tarafından yapılan metal geri kazanım çalışmalarında temel metaller bakır ve nikeli HNO_3 çözeltisinde ayırma çalışmalarını yürütmüşlerdir. Bakır ve nikel iki adımlı liç işleminde 0,1 M HNO_3 sonrasında 1M HNO_3içerisinde ayrıştırılıp altını ikinci adım sonrası kazanılmıştır. Bu prosesde çözücü miktarları bakır ve nikel oranlarını doğrudan etkilemektedir. 0,1 M HNO_3 işlemi nikel yoğunluğa sahip çözelti iken 1M HNO_3 ilavesi ile bakır oranı artış göstermektedir. [Kinoshita et al, 2002].

2003 yılında Jung Oh ve arkadaşları tarafından yapılan atık baskı devre levhalarının liç işleminde baskı devre kart numunelerin elek çapı 1 mm'den

geçirildikten sonra elektrostatik ve manyetik ayrıcılar ile işlem öncesi sınıflandırma uygulanılmış, fiziksel ayırma sonucunda uygulanan liç prosesinde 2M H_2SO_4 ve 0,2M H_2O_2 ,85 ℃ de 12 saat sonunda Cu, Au, Pb, Pd elementleri %95 üzerinde verim ile kazanılmıştır [Oh and Lee, 2003].

2005 yılında Madenoğlu tarafından hazırlanan yüksek lisans tez çalışmasında yaklaşık 1mm boyutundaki baskılı devre kartların 4 farklı tipteki örnekleri (Orijinal, orijinal külü, piroliz, piroliz külü) 7 farklı asit çözeltisinde HCl, H_2SO_4 , H_2SO_4 + H_2O_2, HCl + HNO_3, HNO_3 + $HClO_4$, HCl + NaClO, HNO_3 çözme oranları karşılaştırılmıştır. Metal geri kazanımları dikkate alındığında en etkili yöntemin HCl + HNO_3 olduğu tespit edilmiştir. Liç sürecinde sıcaklık, konsantrasyon ve zaman parametreleri arttırıldığında metal geri kazanım oranları da arttığı görülmüştür [Madenoğlu, 2005].

2006 yılında Veit ve arkadaşları tarafından yapılan metal geri kazanım çalışmalarında baskı devre kartların farklı elek aralığı ve çözücüler ile karşılaştırılmıştır. 0.5-1 mm aralığındaki numunelerin metal içeriği yüksek olmasından deneylerde bu aralık kullanılmıştır. Manyetik ve elektrostatik ayırma işlemlerin etkili olduğu gözlenen çalışmada, baskı devre levhalardan kapasitör direnç transistorlar ayrılıp kral suyu ve sülfürik asit çözücüleri ile deneyler yürütülmüş. Kral suyu ve Sülfürik asit çözeltisinin etkili olduğu, deney çalışmalarında elektro kazanım ile % 98 den fazla bakır kazanımı tespit edilmiştir [Veit et al, 2006].

2008 yılında Young Jun Park ve Derek J.Fray tarafından yapılan Baskı devre kartlarındaki değerli metallerin geri kazanım deneylerinde gümüş, altın ve paladyumun yüksek verimde kazanılması hedeflenmiştir.1/20 (g/ml) sulu ortamda çözülmeyen gümüşün giriş kısmının büyük bir oranı %98 kısmı geri kazanılmıştır. Paladyum kırmızı bir çökelti $Pd(NH_4)_2Cl_6$oluşturarak girişin %93'ü çökerek ayrışmıştır. Altın geri kazanımında tolüen ile birlikte dodecaneethiol ve sodyum borohidrür kullanarak giriş altının %97 oranında kazanımı sağlanmıştır. Sulu ortamda değerli metallerin %96 dan daha yüksek oranda kazanıldığı kral suyunun altın, paladyum ve gümüşün aynı anda etkili liç ettiği tespit edilmiştir [Park and Fray, 2008].

2009 yılında Masavetas ve arkadaşları tarafından yapılan elektro kazanım ile baskı devre kartlarından bakır kazanımı çalışmalarında örnekler 1x2cm boyutlarında parçalandıktan sonra 1 saat boyunca 500 ℃ de işlenip farklı çözücü ortamlarında (HNO_3, HCl, H_2SO_4) bakır çözünme sonuçları bir biri ile kıyaslanmıştır. Bakır geri kazanımları sırasıyla %97.5, %65, %76.5 ölçülüp elektro geri kazanım yöntemi ile % 98 civarında bakır kazanıldığı tespit edilmiştir [Masevetas et al, 2009].

2011 yılında Deveci ve arkadaşları tarafından TV baskı devre kartlarındaki bakırın liç çalışması yürütülmüştür. Sülfürik asit konsantrasyonu 0,45-1,6 M H_2SO_4, hidrojen peroksit konsantrasyonu 0,2-0,8 M H_2O_2 ve sıcaklık 32-68 ℃ aralıklarında 4 saatlik periyotta bakır geri kazanım etkileri inceleme sonucunda H_2O_2 ve sıcaklık liç çalışmalarında önemli parametreler olduğu belirtilmiştir [Deveci ve ark, 2010].

2011 yılında Haiyu Yang ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada atık baskı devre kartların parçalandıktan sonra liç işlemi ile bakırın ayrıştırılması hedeflenmiştir. Sülfürik asit içerisinde oksidant olarak hidrojen peroksit kullanılan ve oda sıcaklığında yürütülen çalışmalarında yüksek verimde bakırın geri kazanımı sağlamak için optimum değerler (100 ml %15 sülfürik asit, 10 ml %30 hidrojen peroksit, 1/10 katı sıvı oranı, 3 saat oda sıcaklığında) tespit edilmiştir. Bakırın etkili oranda ayrıştırılması için 1mm den küçük boyutlara parçalanması gerektiği, baskı devre kartların 0.5 mm den küçük boyuta indirgendiğinde bakır geri kazanımın artmadığı fakat enerji tüketimin arttığı tespit edilmiştir [Yang et al, 2011].

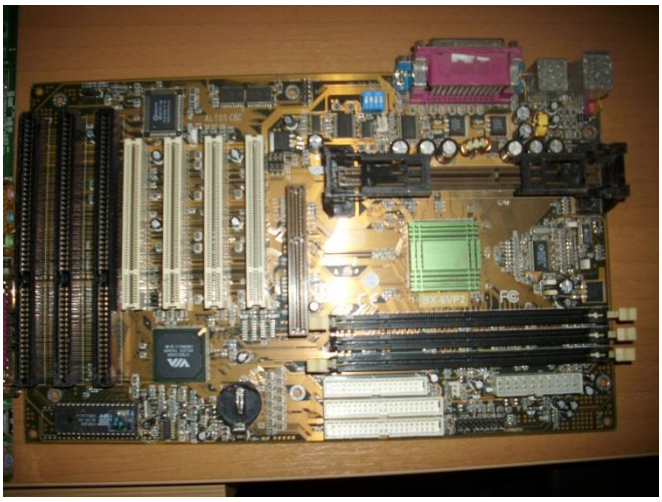
Literatür çalışmalarında; kral suyunun liç yöntemlerinde kullanılan etkili bir asidik çözelti olduğu, baskı devre kartlarının optimum verimde liç edilmesi için 1mm' den küçük boyutlara parçalanması gerektiği tespit edilmiştir.

6. MATERYAL VE METOD

6.1. Kullanılan Materyal ve Cihazlar

Kullanılan Malzeme

Bu çalışma için kullanım ömrü dolan bilgisayarlardan yaklaşık 10 Kg baskı devre kartı toplanılmıştır (Şekil6.1).



Şekil 6.1. Atık baskı devre kartı

Kırıcı ve Elek Sistemi

Baskı devre kartların içerisindeki metallerin optimum seviyede çözeltiye geçmesi için (Net Plasmak) kırıcı sistem kullanılmıştır. Kırıcıdan geçirilen baskı devre kartları (Baz Makine) elek sistemi ile (0,355-0,5), (0,5-1), (1-2,36) mm boyutundaki farklı çaplarda elde edilmiştir.

Hassas Terazi ve Çalkalayıcı

0,5 gram'lık numunelerin hazırlanmasında (Denver instrument) hassas terazi kullanılmıştır. Çözeltiler farklı zaman periyodlarında 150 rpm devirde (ika marka) çalkalama işlemi yapılmıştır.

Inductively Coupled Plasma

(Perkin Elmer) ICP-OES metal analizlerinde kullanılan önemli bir yöntemdir. Standart çözeltiler ile kalibre edildikten sonra örnekler içerisindeki miktarlar ICP-OES ile tanımlanmıştır. Çalışmada demir, bakır ve nikel metallerin liç çözeltisindeki ppm değerleri tespit edilmiş, tespit edilen değerler seyreltme oranları ve litre başına çözünen miktarlara göre hesaplama yapılmıştır.

Etüv ve Desikatör

Liç işlemi sonunda çözünen madde miktarının hesaplanması için filtrasyon kâğıdında biriken materyaller etüvde (Venticell) 105°C'de kurutulur. Filtre kâğıdında biriken materyaller etüvde kurutulduktan sonra desikatöre konulur.

Kül Fırını

Liç işlemlerinde kullanılan (0,355-0,5), (0,5-1), (1-2,36) mm boyutundaki baskı devre kartların plastik içeriğinin belirlenmesi için 700 °C sıcaklıkta 15 dakika kül fırınında (Electro-mag) yakılmıştır.

6.2. METOD

Kullanım ömrü dolan baskı devre kartların içerisindeki kapasitör ve pil elle ayrıştırılmıştır. Baskı devre kartlarından yüksek verimde metal kazanımı sağlamak için makas ile 3x3 cm boyutunda kesilmiştir. Boyutu küçültülen baskı devre kartları maksimum verimi sağlamak için kırıcı sistemde daha küçük boyutlara indirgenmiştir. Şekil 6.2 deki kırıcı sistem içerisine yerleştirilen elek ile farklı fraksiyonlarda baskı devre kartları oluşturulmuştur. Çalışmada kırıcı sistemdeki elek üstü ve elek altı numuneler (Baz Makine) elek sistemi ile (0,355-0,5), (0,5-1), (1-2,36) mm aralığında (Şekil 6.3) farklı çaplarda elde edilmiştir.

Şekil 6.2. Kırıcı ünitesi

Şekil 6.3. Elek sistemi ile oluşturulan baskı devre kartı fraksiyonları

Baskı devre kartlarındaki demir (Fe), bakır (Cu), nikel (Ni) metallerin liç işleminin yürütülmesi için 750 ml hidroklorik asit ve 250 ml nitrik asitin karıştırılmasıyla oluşan kral suyu Balon joje de hazırlanmıştır. Çizelge 6.1'de Yanıt yüzey metodu için tanımlanan değişen kodları katı sıvı oranı için minimum 1/67 (-1), optimum 1/100 (0) , maksimum 1/200 (+1), liç işlemimin süresi için minimum 1 (-1),

optimum 4 (0) , maksimum 7 (+1) saat, partikül boyutu için minimum 0,355-0,5 (-1), optimum 0,5-1 (0) , maksimum 1-2,36 (+1) değerleri belirlenmiştir.

Çizelge 6.1. Yanıt yüzey metodu için tanımlanan değişken kodları

Katı / Sıvı Oranı			Zaman (saat)			Partikül boyutu (mm)		
-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
1/67	1/100	1/200	1	4	7	0,355-0,5	0,5-1	1-2,36

Kırıcı ve elekten geçirilen partikül çapları (0,355-0,5 mm), (0,5-1mm), (1-2,36 mm) olan baskı devre kartları, erlen içerisinde 0,5 gram sabit miktardaki ağırlığa karşın 1/67, 1/100, 1/200 g/ml katı sıvı oranları ve 1saat, 4saat ve 7 saatlik sürelerde Çizelge 6.2'deki deney tasarımına göre liç işlemi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.2'deki deney tasarımındaki her bir deney, minimum sapma miktarı sağlamak için 3 tekrarlı olmak üzere oda sıcaklığında yürütülmüştür. 0,5 gram ağırlığında, oda sıcaklığında yürütülen deneylerde zaman, partikül çapı ve katı/sıvı oranları değişken kabul edilip yanıt yüzey yöntemi ile optimum partikül çapı, zaman ve katı sıvı oranı tespit edilmiştir.

Yanıt yüzey metodunda belirlenen optimum partikül çapı değerlerin doğrulanmasında süzme işlemi sonunda filtre kağıdında biriken çözünmeyen madde miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca partikül çaplarında (0,355-0,5mm), (0,5-1mm), (1-2,36 mm) metal olmayan malzemelerin oranını hesaplamak için kül fırınında 700 °C sıcaklıkta 15 dakika yakılmıştır.

Çizelge 6.2. Metal optimizasyonu için yüzey merkezcil deney tasarımı

Deneyler	Katı/Sıvı Oranı (%m/v)		Zaman (Saat)		Partikül Boyutu (mm)	
	Kod	Değer	Kod	Değer	Kod	Değer
1	-1	1/67	-1	1	-1	0,355-0,5
2	-1	1/67	+1	7	-1	0,355-0,5
3	-1	1/67	-1	1	+1	1-2,36
4	-1	1/67	+1	7	+1	1-2,36
5	+1	1/200	-1	1	-1	0,355-0,5
6	+1	1/200	+1	7	-1	0,355-0,5
7	+1	1/200	-1	1	+1	1-2,36
8	+1	1/200	+1	7	+1	1-2,36
9	-1	1/67	0	4	0	0,5-1
10	+1	1/200	0	4	0	0,5-1
11	0	1/100	0	4	-1	0,355-0,5
12	0	1/100	0	4	+1	1-2,36
13	0	1/100	-1	1	0	0,5-1
14	0	1/100	+1	7	0	0,5-1
15	0	1/100	0	4	0	0,5-1
16	0	1/100	0	4	0	0,5-1
17	0	1/100	0	4	0	0,5-1

7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR

7.1. Baskı Devre Kartlarındaki Demir, Bakır ve Nikel'in Liç İşlemi ile Çözünmesinin Optimizasyonu

Deneylerde Baskı devre kartlarındaki demir (Fe), bakır (Cu) ve Nikel'in (Ni) liç işleminin yürütülmesi için 750 ml hidroklorik asit ve 250 ml nitrik asitin karıştırılmasıyla kral suyu hazırlanılmıştır. Çözeltide belirlenen katı sıvı oranı, zaman ve partikül çapına karşın 0,5 gram sabit ağırlık, devir (150rpm) ve oda sıcaklığı koşullarında optimizasyon çalışması yürütülmüştür.

Değer Aralıklarının Ön Denemelerle Belirlenmesi

- Katı/Sıvı Oranındaki Değişimin Ekstraksiyona Etkisi
- Zamandaki Değişimin Ekstraksiyona Etkisi
- Partikül Boyutundaki Değişiminin Metoliz Reaksiyonuna Etkisi

7.2. Deneysel Tasarım

Elektronik baskı devre kartlarında metal ektraksiyonuna etki eden, üç bağımsız değişken faktör, katı/sıvı oranı, zaman ve partikül boyutu etkisinin incelenmesi ve optimum koşulların belirlenmesi amacıyla deneysel tasarımdan yararlanılmış, bu amaçla Yanıt Yüzey Metodolojisi kullanılmıştır. Bağımsız değişkenler için değer aralığı belirlemek amacıyla daha önce yapılan deneylerin sonuçları da kullanılarak bir dizi ön deneme yapılmıştır. Bu ön denemeler ile elde edilen demir grafikleri Şekil 7.2, 7.3 ve 7.4'de verilmiştir. Deneyler ortam sıcaklığındadır. Bu yapılan ön deneme sonuçlarından faydalanılarak reaksiyona etki eden bağımsız değişkenlerin değer aralıkları belirlenmiştir. Çizelge 7.1'de yüzey merkezcil deney tasarımında çalışılan 3 faktör (katı/sıvı oranı, zaman ve partikül boyutu) ve kodlanan 3 değişken seviyesi (-1, 0, +1) görülmektedir.

Çizelge 7.1. Yüzey merkezcil deney tasarımında kullanılan bağımsız değişkenler için kodlanan seviyeler ve bu kodlara karşılık gelen değerler

Bağımsız Değişkenler	**Kodlar**	**Değişken Seviyeleri**		
		-1	0	+1
Katı/sıvı oranı (m/v)	x_1	1/200	1/67	1/100
Zaman (sa)	x_2	1	4	7
Partikül boyutu (mm)	x_3	0,5	1	1,5

7.3. Baskı Devre Kartlarındaki Demir'in Liç İşlemi ile Çözünmesinin Optimizasyonu

Baskı devre kartların liç işlemi sonunda ICP-OES cihazında demir miktarı analiz edilmiştir. Analiz sonuçları seyreltme oranı (1/100) ve katı/sıvı oranları dikkate alınarak çözeltiye geçen demir miktarı hesaplanmıştır.

Yüzey merkezcil deney tasarımı ile belirlenen 3 değişkenli ve 3 seviyeli deney deseninin noktaları (kodları ve değerleri) Çizelge 7.2' de verilmiştir. Merkez noktasında iki tekrar yapılmıştır.

Çizelge 7.2. Demir ekstraksiyonunun optimizasyonu için yüzey merkezcil deney tasarımı

Deneyler	Katı/Sıvı Oranı (%m/v)		Zaman (Saat)		Partikül Boyutu (mm)		Yanıt-Demir Miktarı (mg)
	x_1		x_2		x_3		
	Kod	Değer	Kod	Değer	Kod	Değer	Değer
1	-1	1/200	-1	1	-1	0,355-0,5	14,353±4,069
2	-1	1/200	+1	7	-1	0,355-0,5	15,411±3,76
3	-1	1/200	-1	1	+1	1-2,36	2,554±3,150
4	-1	1/200	+1	7	+1	1-2,36	3,424±2,702
5	+1	1/67	-1	1	-1	0,355-0,5	12,420±1,099
6	+1	1/67	+1	7	-1	0,355-0,5	14,283±0,3504
7	+1	1/67	-1	1	+1	1-2,36	0,863±0,0851
8	+1	1/67	+1	7	+1	1-2,36	0,917±0,15075
9	-1	1/200	0	4	0	0,5-1	11,236±4,836
10	+1	1/67	0	4	0	0,5-1	20,883±3,596
11	0	1/100	0	4	-1	0,355-0,5	13,977±0,8425
12	0	1/100	0	4	+1	1-2,36	1,868±1,514
13	0	1/100	-1	1	0	0,5-1	8,118±4,569
14	0	1/100	+1	7	0	0,5-1	20,660±4,2411
15	0	1/100	0	4	0	0,5-1	18,495±3,009
16	0	1/100	0	4	0	0,5-1	18,495±3,009
17	0	1/100	0	4	0	0,5-1	18,495±3,009

7.3.1. Farklı Reaksiyon Koşullarında Baskı Devre Kartındaki Demir Elementi Ekstraksiyonunun İstatiksel Açıdan Değerlendirilmesi

İstatistiksel analizlerde STATISTICA 8.0 (StatSoft, Inc.) paket programlarından yararlanılarak bağımsız değişkenlere karşılık bağımlı değişken yanıt için "ANOVA Analizi" yapılmıştır. 3 değişken, 3 seviye yüzey merkezcil deney tasarımında elde edilen yanıtların değerlendirilmesinde aşağıda verilen 2. dereceden polinom eşitliği kullanılmıştır.

$$\mathrm{Y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3} \beta_{\mathrm{i}} x_i + \sum_{i=1}^{3} \beta_{\mathrm{ii}} x_i^2 + \sum \sum_{j=i+1}^{3} \beta_{ij} x_i x_j$$

Bu denklemde; β_0, ortalama etki, β_i, $\beta_{ii,}$ β_{ij} ise sırasıyla değişkenlerin lineer, kuadratik ve etkileşimleri için belirlenen katsayılardır. x_i ve x_j de bağımsız değişkenlerdir. Bağımsız değişkenlerle bağımlı değişken arasındaki ilişkiye bağlı olarak lineer ve kuadratik modellerde etkilerinin tahminleri ve katsayıları alınmıştır. Bu değerler Çizelge 7.3' de verilmiştir.

Çizelge 7.3. Demir ekstraksiyonun optimizasyonu için bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiye bağlı olarak lineer ve kuadratik modellerde etkilerin tahminleri ve katsayıları

Faktör	Etki	Standart hata	t değeri	p değeri	Katsayı
Sabit	16,9971	1,78	9,54	0,000029	16,99706
Katı/sıvı oranı (1L)	0,4776	2,63	0,18	0,86128	0,2388
Katı/sıvı oranı (1Q)	0,3718	5,09	0,07	0,94381	0,1859
Zaman (2L)	3,2774	2,63	1,24	0,253527	1,6387
Zaman (2Q)	-2,9692	5,09	-0,58	0,577944	-1,4846
Partikülboyutu (3L)	-12,1636	2,63	-4,62	0,002435[a]	-6,0818
Partikülboyutu (3Q)	-15,9022	5,09	-3,12	0,01674[b]	-7,9511
1L * 2L	-0,0028	2,95	-0,00	0,999281	-0,00138
1L * 3L	-0,2842	2,95	-0,1	0,925825	-0,14212
2L * 3L	-0,4992	2,95	-0,17	0,870199	-0,24962

L : Lineer,
Q : Kuadratik
[a]: $p<0,01$ lineer düzeyinde anlamlı
[b]: $p<0,05$ kuadratik düzeyinde anlamlı

Oluşturulan ve 2. dereceden bir polinom olan model denklem Eşitlik (7.1) aşağıda gösterilmiştir. Bu denklemde bağımsız değişkenler (x_i) için kullanılan semboller, "x_1", "x_2" ve "x_3"'dir. "x_1" katı/sıvı oranını, "x_2" zamanı ve "x_3" ise partikül boyutunu ifade etmektedir.

Çözünen Demir İçeriği (mg) =

$$16,99706+0,2388x_1+01859x_1^2+1,6387x_2-1,4846x_2^2-6,0818x_3-7,9511x_3^2-0,00138x_1x_2-0,14212x_1x_3-0,24962x_2x_3 \quad (7.1)$$

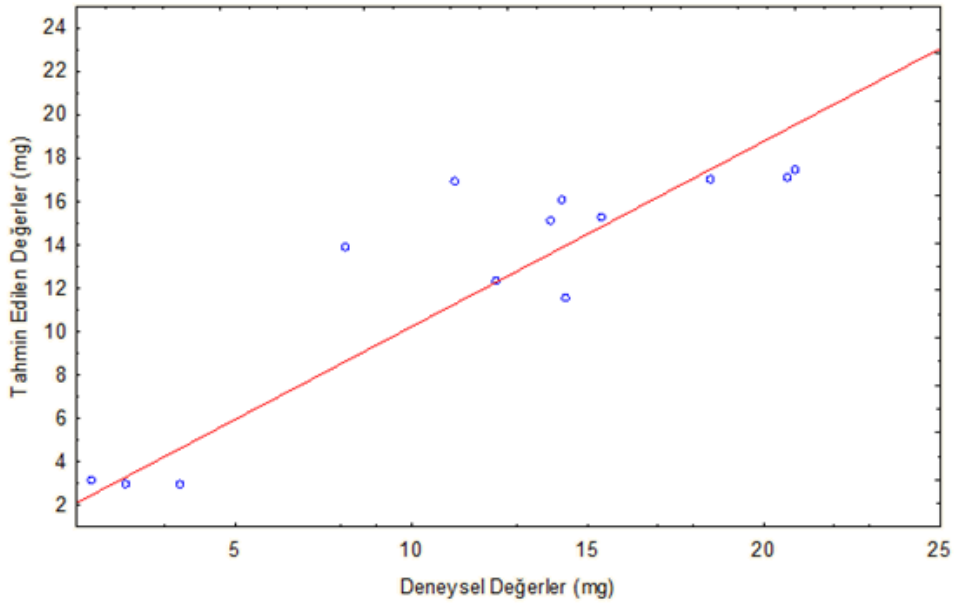
Çizelge 7.3'deki sonuçlar incelendiğinde, partikül boyutunun lineer etkisi $p<0,01$ düzeyinde, yine partikül boyutunun kuadratik etkisinin $p<0,05$ düzeyindedir. Diğer tüm faktörlerin lineer ve birlikte etkisi $p>0,01$ ve kuadratik etkisi $p>0,05$'dir. Bunun anlamı ise ektraksiyona partikül boyutunun etkisi diğer parametrelere göre daha fazladır.

Oluşturulan Yanıt yüzey modelinde, katı/sıvı oranını, zamanı ve partikül boyutu olmak üzere 3 farklı bağımsız değişken için gözlenen minimum, maksimum ile optimum değerler Çizelge 7.4'de görülmektedir.

Çizelge 7.4. Demir ekstraksiyonun optimizasyonu için bağımsız değişkenlerin minimum, maksimum ve optimum değerleri

Faktör	**Gözlenen minimum Değer**	**Optimum Değer**	**Gözlenen maksimum Değer**
Katı/sıvı oranı	1/200 (g/l)	1/166.7	1/67
Zaman	1 (saat)	5,75	7
Partikül boyutu	0,5(mm)	0,8	1,5

Daha önce elde edilmiş olan model denklemden yararlanarak, gözlenen değerlere karşılık tahmin edilen değerler arasındaki ilişki Şekil 7.1'de verilmiştir. Faktörlerin model denklemde yerine konması ile elde edilen demir miktarıyla (tahmin edilen değer), deney sonucunda elde edilen veriler (deneysel değerler) arasındaki ilişki büyük oranda lineerlik göstermektedir. Grafikten de görüldüğü gibi korelasyon katsayısının 0,85 olması da bu durumu doğrulamaktadır.

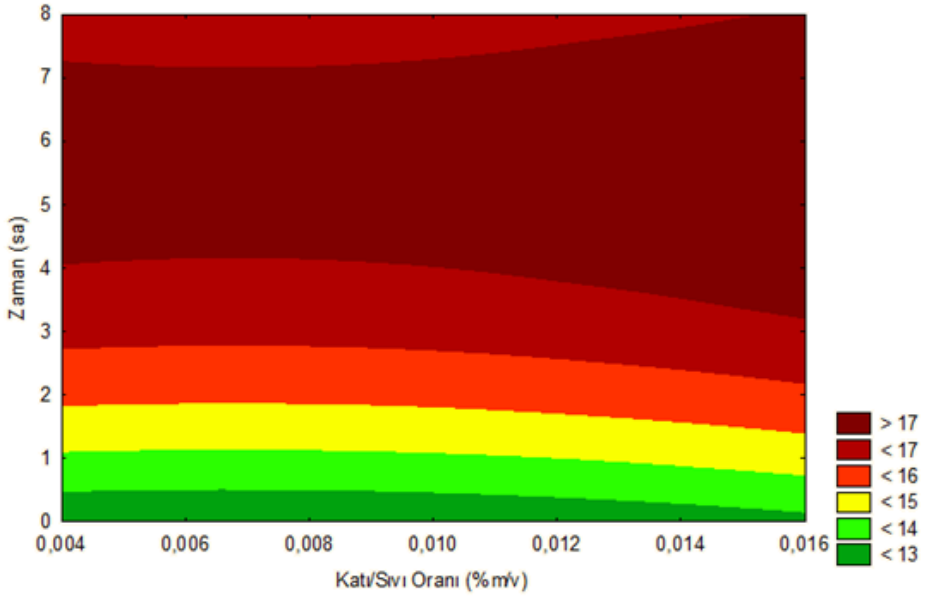


Şekil 7.1. Deneysel olarak elde edilen demir (mg) değerlerine karşılık model fonksiyondan elde edilen demir (mg) değerleri arasındaki ilişki

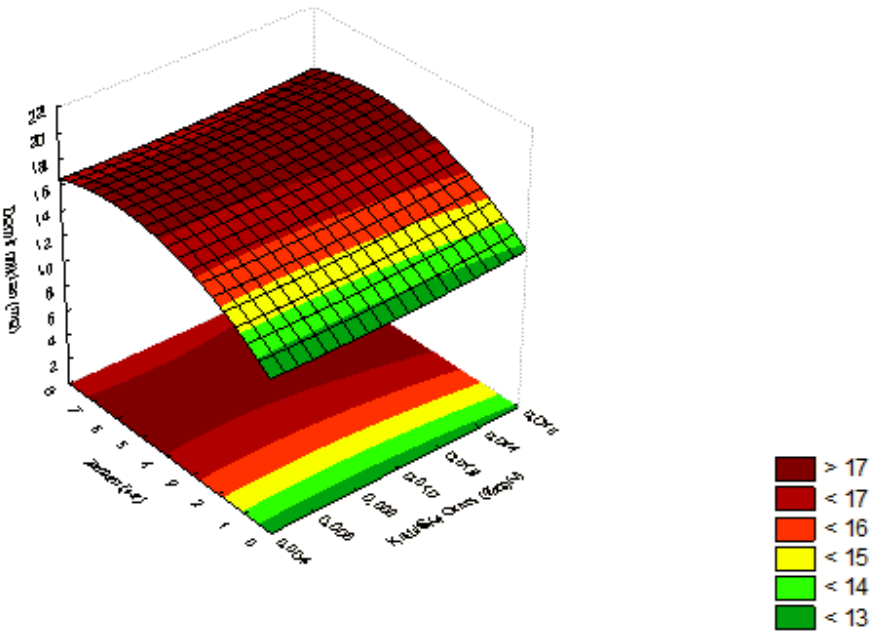
7.3.2. Demir Miktarının Yanıt Yüzey ve İz düşüm Grafiklerinde Yorumlanması

Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen demir içeriğinin katı/sıvı oranına ve zamana göre değişimini gösteren iz düşüm (Contour Plot) ve yanıt yüzey grafikleri (Response Surface) Şekil 7.2a ve 7.2b'de görülmektedir. İz düşüm grafiklerinde, denemeler neticesinde elde edilen yanıt değerlerine ait eğriler bir düzlem üzerinde gösterilir. Bu düzleme ait koordinatlar ise bağımsız değişkenlerin seviyelerini göstermektedir. Her bir iz düşüm eğrisi, bağımsız değişkenlere ait seviyelerin bir birleşimi olarak ifade edilen bir düzlemle yüzey arasındaki yüksekliği temsil eden özel bir değere sahiptir.

Şekil 7.2a incelendiğinde katı/sıvı oranı ve zaman merkezden uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Bu grafikten anlaşılacağı üzere demir ekstraksiyonunun dönüşümünün en yüksek olacağı katı/sıvı oranı aralığı 1/200-1/67 ve zaman aralığının 4-7 saat olduğu aralıktır. Katı/sıvı oranı 1/200-1/67 aralığında demir ekstraksiyonu katı/sıvı oranından bağımsızdır. Ancak zaman olarak 4-7 saat aralığının dışında (üstünde ve altında) demir ektraksiyon veriminde azalma gözlemlenmektedir.



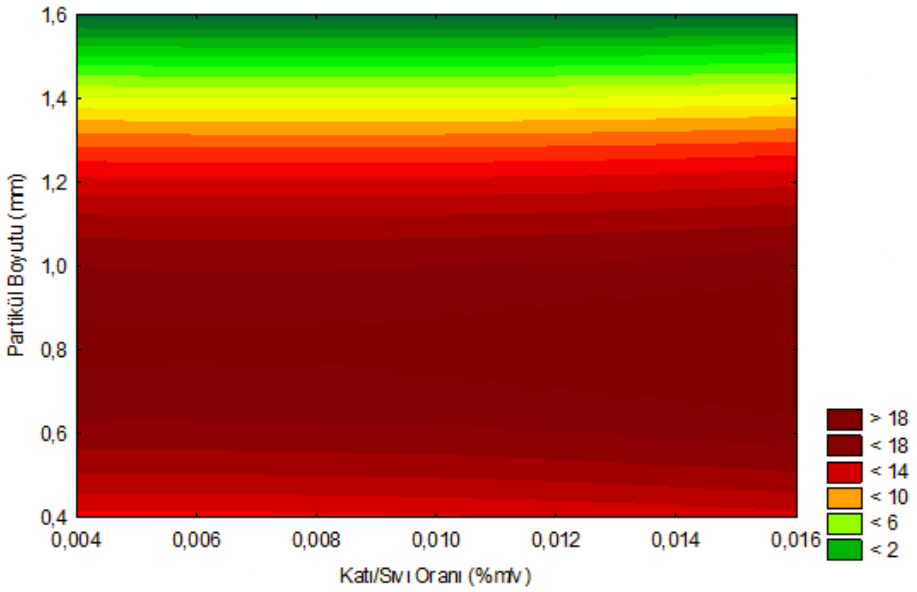
Şekil 7.2 a. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen demir (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve zaman ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği



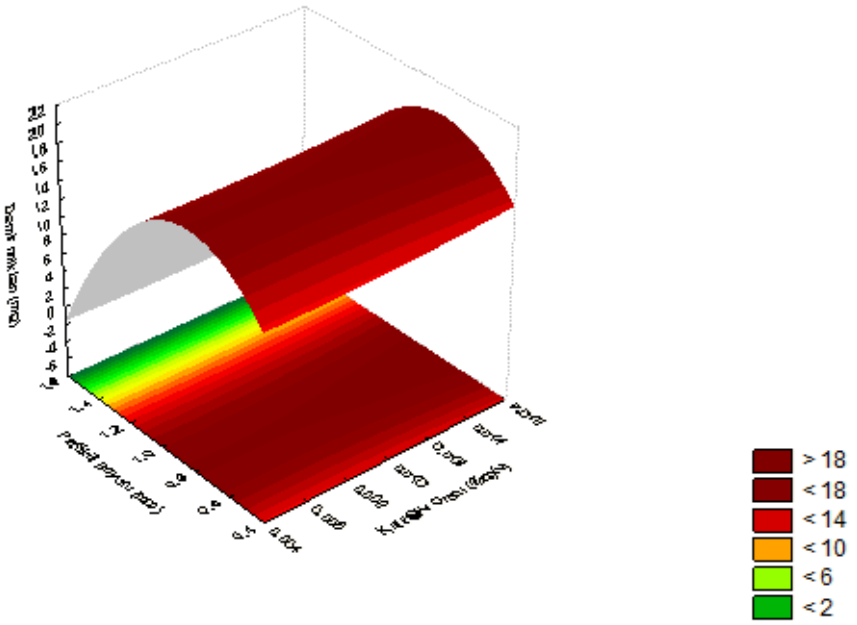
Şekil 7.2b Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen demir (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve zaman ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği

Demir miktarının katı/sıvı oranı ve partikül boyutuna göre değişimini gösteren yanıt yüzey ve iz düşüm grafikleri Şekil 7.3a ve 7.3b'de görülmektedir. Şekillerde görüldüğü üzere partikül boyutunun reaksiyona etkisi katı/sıvı oranı parametresine göre çok daha fazladır. Bu grafikten anlaşılacağı üzere demir ekstraksiyonunun dönüşümünün en yüksek olacağı katı/sıvı oranı aralığı 1/200-1/67 ve partikül boyutu

aralığının 0,76-0,86 mm olduğu aralıktır. Katı/sıvı oranı 1/200-1/67 aralığında demir ekstraksiyonu katı/sıvı oranından bağımsızdır. Ancak partikül çapı olarak 0,76-0,86 mm aralığının dışında (üstünde ve altında) demir ektraksiyon veriminde azalma gözlemlenmektedir.

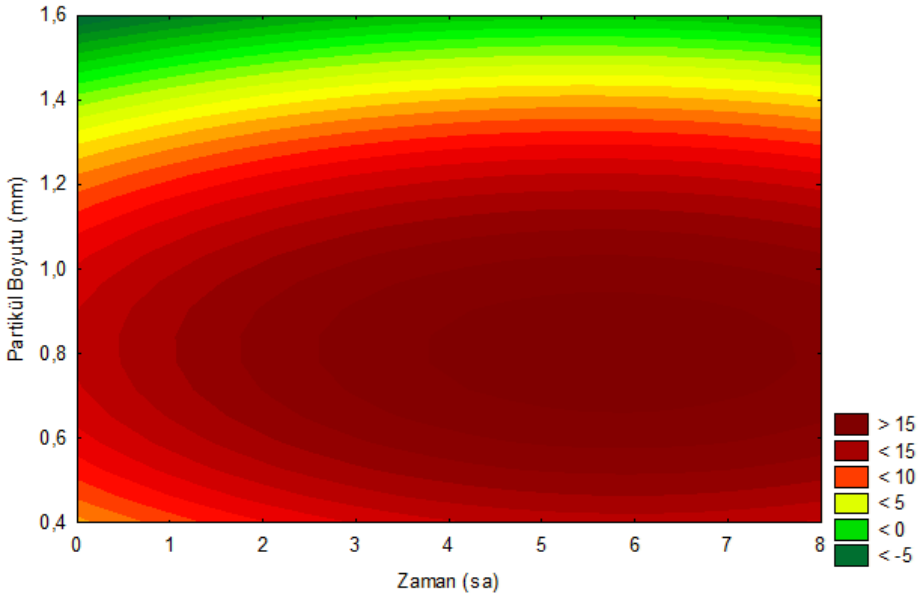


Şekil 7.3a. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen ürünün demir (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve partikül boyutu ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği

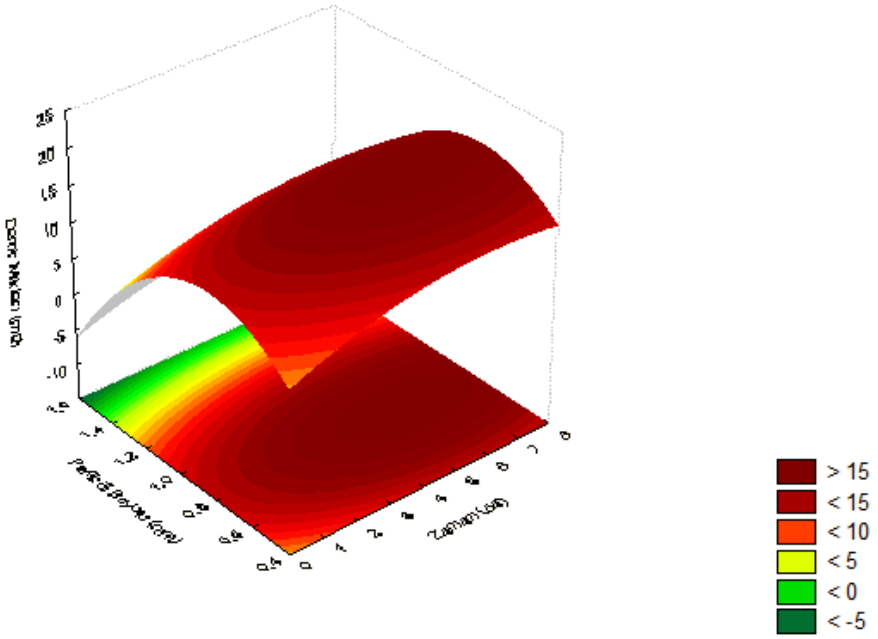


Şekil 7.3b. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen demir (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve partikül boyutu ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği

Demir miktarının zaman ve partikül boyutuna göre değişimini gösteren yanıt yüzey ve iz düşüm grafikleri Şekil 7.4a ve 7.4b'de görülmektedir. Bu grafiklerden anlaşılacağı üzere demir ekstraksiyonunun dönüşümünün en yüksek olacağı zaman aralığı 4-7 saat ve partikül boyutu aralığının 0,76-0,86 mm olduğu aralıktır. Merkezden uzaklaştıkça demir ekstraksiyon veriminde azalma gözlemlenmektedir.



Şekil 7.4a. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen demir (mg) miktarının, zaman ve partikül boyutu ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği



Şekil 7.4b. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen demir (mg) miktarının, zaman ve partikül boyutu ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği

7.4. Baskı Devre Kartlarındaki Bakır'ın Liç İşlemi İle Çözünmesinin Optimizasyonu

Baskı devre kartların liç işlemi sonunda ICP-OES cihazında bakır miktarı analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında seyreltme oranı (1/100), katı/sıvı oranları dikkate alınarak çözeltiye geçen bakır miktarı (Çizelge 7.5'de) hesaplanmıştır.

Ön denemeler ile elde edilen bakır grafikleri Şekil 7.6 7.7 ve 7.8'de verilmiştir. Deneyler ortam sıcaklığındadır. Bu yapılan ön deneme sonuçlarından faydalanılarak reaksiyona etki eden bağımsız değişkenlerin değer aralıkları belirlenmiştir. Yüzey merkezcil deney tasarımı ile belirlenen 3 değişkenli ve 3 seviyeli deney deseninin noktaları (kodları ve değerleri ile) Çizelge 7.5'de verilmiştir. Merkez noktasında iki tekrar yapılmıştır.

Çizelge 7.5. Bakır ekstraksiyonunun optimizasyonu için yüzey merkezcil deney tasarımı

Deneyler	Katı/Sıvı Oranı (%m/v) x_1		Zaman (Saat) x_2		Partikül Boyutu (mm) x_3		Yanıt-Bakır Miktarı (mg)
	Kod	Değer	Kod	Değer	Kod	Değer	Değer
1	-1	1/200	-1	1	-1	0,355-0,5	132,962±12,63
2	-1	1/200	+1	7	-1	0,355-0,5	127,417±20,16
3	-1	1/200	-1	1	+1	1-2,36	115,609±38,73
4	-1	1/200	+1	7	+1	1-2,36	86,028±45,27
5	+1	1/67	-1	1	-1	0,355-0,5	121,667±0,63
6	+1	1/67	+1	7	-1	0,355-0,5	122,033±4,99
7	+1	1/67	-1	1	+1	1-2,36	136,400±12,89
8	+1	1/67	+1	7	+1	1-2,36	120,000±3,98
9	-1	1/200	0	4	0	0,5-1	173,865±19,15
10	+1	1/67	0	4	0	0,5-1	187,600±11,38
11	0	1/100	0	4	-1	0,355-0,5	116,450±10,53
12	0	1/100	0	4	+1	1-2,36	134,500±23,36
13	0	1/100	-1	1	0	0,5-1	154,7±22,042
14	0	1/100	+1	7	0	0,5-1	183,500±7,10
15	0	1/100	0	4	0	0,5-1	178,100±9,99
16	0	1/100	0	4	0	0,5-1	178,100±9,99
17	0	1/100	0	4	0	0,5-1	178,100±9,99

7.4.1. Farklı Reaksiyon Koşullarında Baskı Devre Kartından Bakır Elementi Ekstraksiyonunun İstatiksel Açıdan Değerlendirilmesi

İstatistiksel analizlerde STATISTICA 8.0 (StatSoft, Inc.) paket programlarından yararlanılarak bağımsız değişkenlere karşılık bağımlı değişken yani yanıt için "ANOVA Analizi" yapılmıştır. 3 değişken, 3 seviye yüzey merkezcil deney tasarımında elde edilen yanıtların değerlendirilmesinde aşağıda verilen 2. dereceden polinom eşitliği kullanılmıştır.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{3} \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{j=i+1}^{3} \beta_{ij} x_i x_j$$

Bu denklemde; β_0, ortalama etki, β_i, β_{ii}, β_{ij} ise sırasıyla değişkenlerin lineer, kuadratik ve etkileşimleri için belirlenen katsayılardır. x_i ve x_j de bağımsız değişkenlerdir. Bağımsız değişkenlerle bağımlı değişken arasındaki ilişkiye bağlı olarak lineer ve kuadratik modellerde etkilerinin tahminleri ve katsayıları alınmıştır. Bu değerler Çizelge 7.6'da verilmiştir.

Çizelge7.6. Bakır ekstraksiyonun optimizasyonu için bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiye bağlı olarak lineer ve kuadratik modellerde etkilerin tahminleri ve katsayıları

Faktör	Etki	Standart hata	t değeri	p değeri	Katsayı
Sabit	177,839	5,25	33,84	0,000000	177,8393
Katı/sıvı oranı (1L)	10,364	7,77	1,33	0,223838	5,1819
Katı/sıvı oranı (1Q)	6,178	15,0	0,41	0,692863	3,0888
Zaman (2L)	-4,472	7,77	-0,58	0,582777	-2,236
Zaman (2Q)	-17,087	15,0	-1,14	0,292246	-8,5437
Partikül boyutu (3L)	-5,598	7,77	-0,72	0,494373	-2,7992
Partikül boyutu (3Q)	-104,337	15,0	-6,95	0,000220	-52,167
1L * 2L	4,773	8,68	0,55	0,59963	2,3865
1L * 3L	17,860	8,68	2,06	0,078725	8,9302
2L * 3L	-10,201	8,68	-1,17	0,27851	-5,1003

L : Lineer,

Q : Kuadratik

[a]: $p<0,01$ lineer düzeyinde anlamlı

[b]: $p<0,05$ kuadratik düzeyinde anlamlı

Oluşturulan ve 2. dereceden bir polinom olan model denklem Eşitlik (7.2) aşağıda gösterilmiştir. Bu denklemde bağımsız değişkenler (x_i) için kullanılan semboller, "x_1", "x_2" ve "x_3"'dir. "x_1" katı/ sıvı oranını, "x_2" zamanı ve "x_3" ise partikül boyutunu ifade etmektedir.

Çözünen Bakır İçeriği (mg) =

$$177,8393+5,1819x_1+3,0888x_1^2-2,236x_2-8,5437x_2^2-2,7992x_3-52,1687x_3^2$$
$$+2,3865x_1x_2+8,9302x_1x_3-5,1003x_2x_3 \quad (7.2)$$

Çizelge 7.6 sonuçları incelendiğinde, partikül boyutunun kuadratik etkisinin $p<0,05$ düzeyindedir. Diğer tüm faktörlerin lineer ve birlikte etkisi $p>0,01$ ve kuadratik etkisi $p>0,05$'dir. Ancak partikül boyutunun kuadratik etkisi yanıt değerini azaltıcı yöndedir.

Baskı devre kartlarında liç yöntemi ile metal kazanım çalışmalarında partikül çapı parametresinin etkinliği Yang ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Atık baskı devre kartlarının farklı partikül çaplarındaki (2-4), (1-2), (0,5-1), (<0,5) verimliliği konusunda yaptığı çalışmada küçülen boyutla (1mm altı) liç veriminin etkisinin arttığı tespit etmiştir. 0,5 mm'den küçük boyutta liç yöntemi ile metal kazanımın artmadığı bununla birlikte enerji tüketiminin arttığı belirtilmiştir. [Yang, 2011]

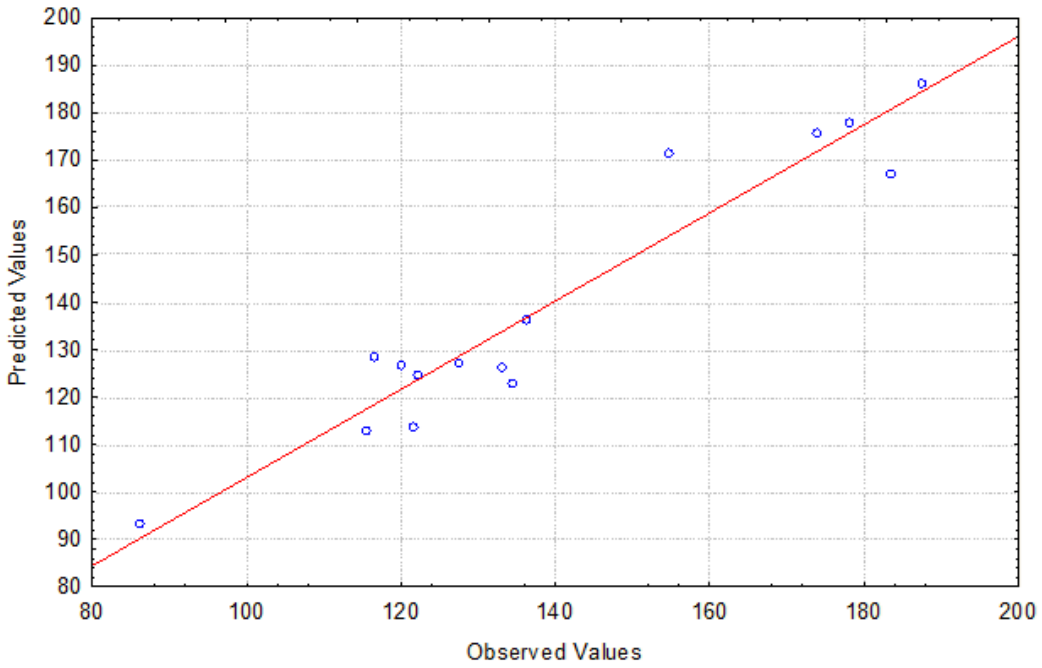
Oluşturulan Yanıt yüzey modelinde, katı/sıvı oranını, zamanı ve partikül boyutu olmak üzere 3 farklı bağımsız değişken için gözlenen minimum ve maksimum değerler ile optimum değerler Çizelge 7.7'de görülmektedir.

Çizelge7.7. Bakır ekstraksiyonun optimizasyonu için bağımsız değişkenlerin minimum, maksimum ve optimum değerleri

Faktör	**Gözlenen Minimum Değer**	**Optimum Değer**	**Gözlenen Maksimum Değer**
Katı/sıvı oranı(g/l)	1/200	1/149.3	1/67
Zaman(saat)	1	3,398	7
Partikül boyutu (mm)	0,5	0,96	1,5

Daha önce elde edilmiş olan model denklemden yararlanarak, gözlenen değerlere karşılık tahmin edilen değerler arasındaki ilişki Şekil 7.5'de verilmiştir.

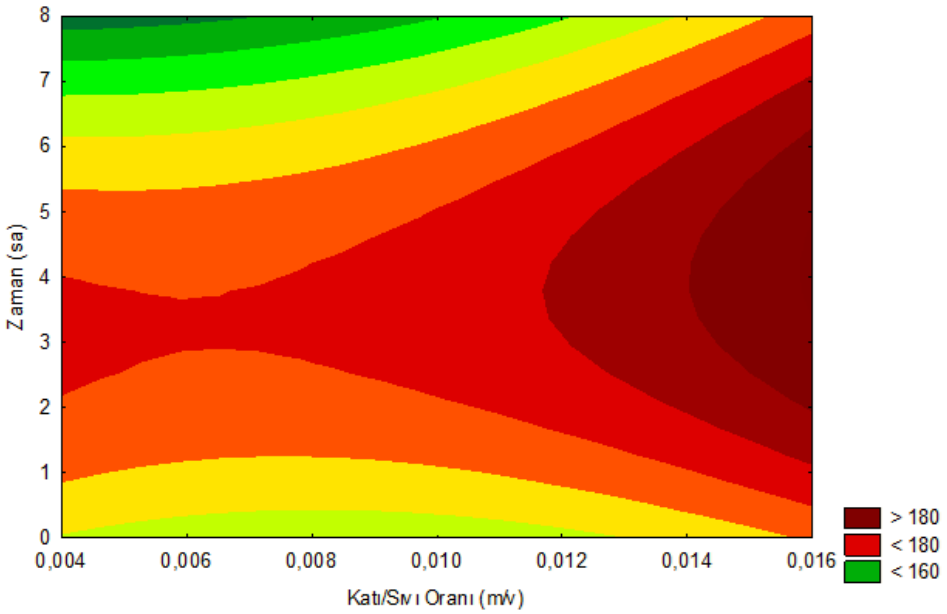
Faktörlerin model denklemde yerine konması ile elde edilen bakır miktarıyla (tahmin edilen değer), deney sonucunda elde edilen veriler (deneysel değerler) arasındaki ilişki büyük oranda lineerlik göstermektedir. Grafikten de görüldüğü gibi korelasyon katsayısının 0,93 olması da bu durumu doğrulamaktadır



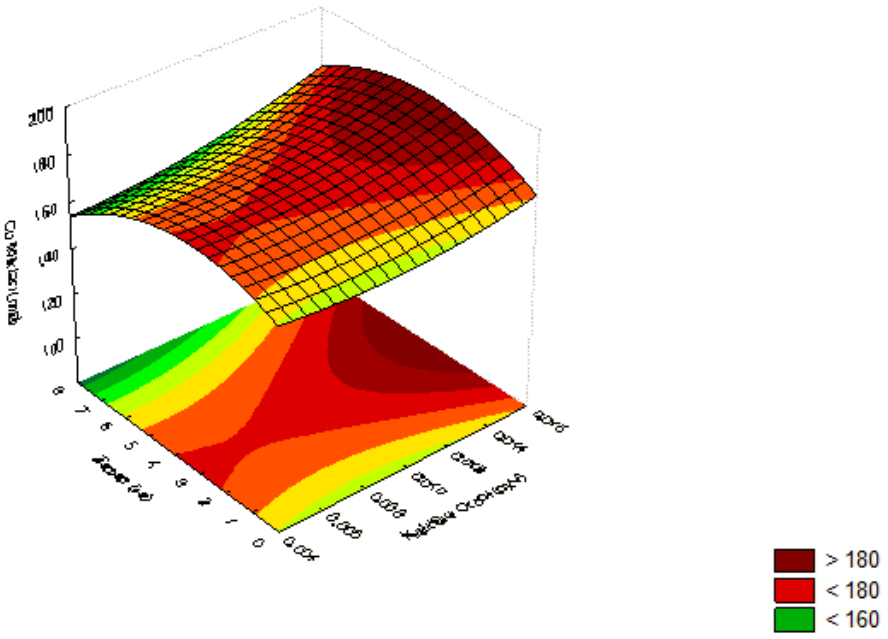
Şekil 7.5 Deneysel olarak elde edilen bakır (mg) değerlerine karşılık model fonksiyondan elde edilen bakır (mg) değerleri arasındaki ilişki

7.4.2. Bakır Miktarının Yanıt Yüzey ve İz düşüm Grafiklerinde Yorumlanması

Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen bakır içeriğinin katı/sıvı oranına ve zamana göre değişimini gösteren iz düşüm (Contour Plot) ve yanıt yüzey grafikleri (Response Surface) Şekil 7.6a ve 7.6b'de görülmektedir. İz düşüm grafiklerinde, denemeler neticesinde elde edilen yanıt değerlerine ait eğriler bir düzlem üzerinde gösterilir. Bu düzleme ait koordinatlar ise bağımsız değişkenlerin seviyelerini göstermektedir. Her bir iz düşüm eğrisi, bağımsız değişkenlere ait seviyelerin bir birleşimi olarak ifade edilen bir düzlemle yüzey arasındaki yüksekliği temsil eden özel bir değere sahiptir. Şekil 7.6a incelendiğinde grafik katsayılara bağlı olarak eş yükselti eğrileri eyer şeklindedir (saddle point). Maksimum nokta, minimum nokta (eyer noktası), durgun tepe ya da yükselen/azalan tepe koşullarını verebilmektedir. Yanıt yüzeyinin eyer şeklindeki yüzeyler zaman iç etkileşimin önemli olduğunu göstermektedir. Katı/sıvı oranı 0,0014-0,016 aralığında bakır miktarı maksimumken, bu değere karşılık gelen zaman değeri 2-6 saat aralığıdır.

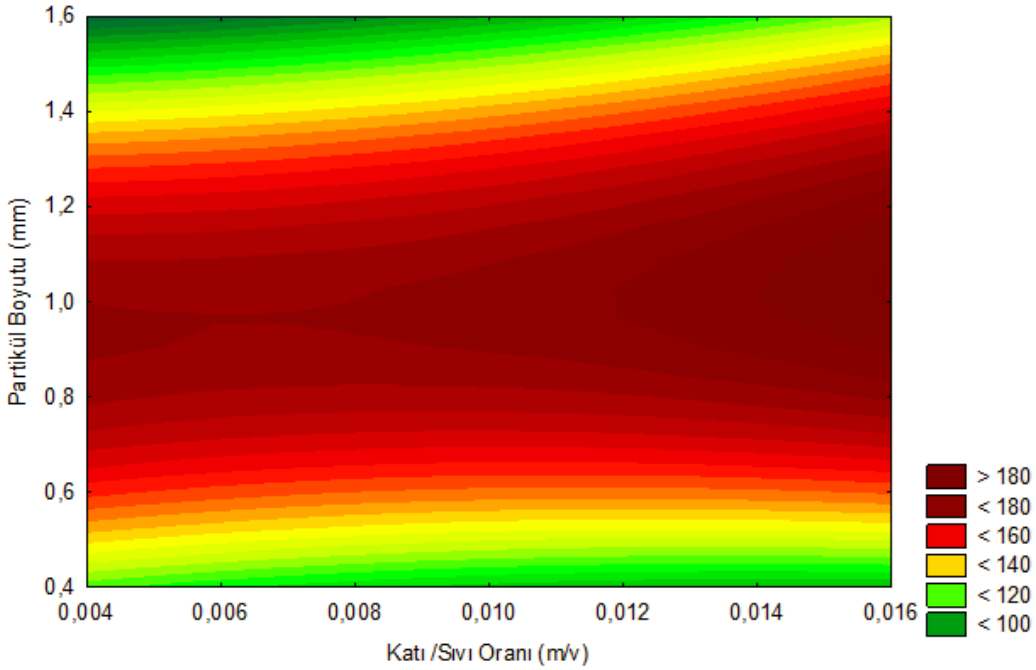


Şekil 7.6 a. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen bakır (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve zaman ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği

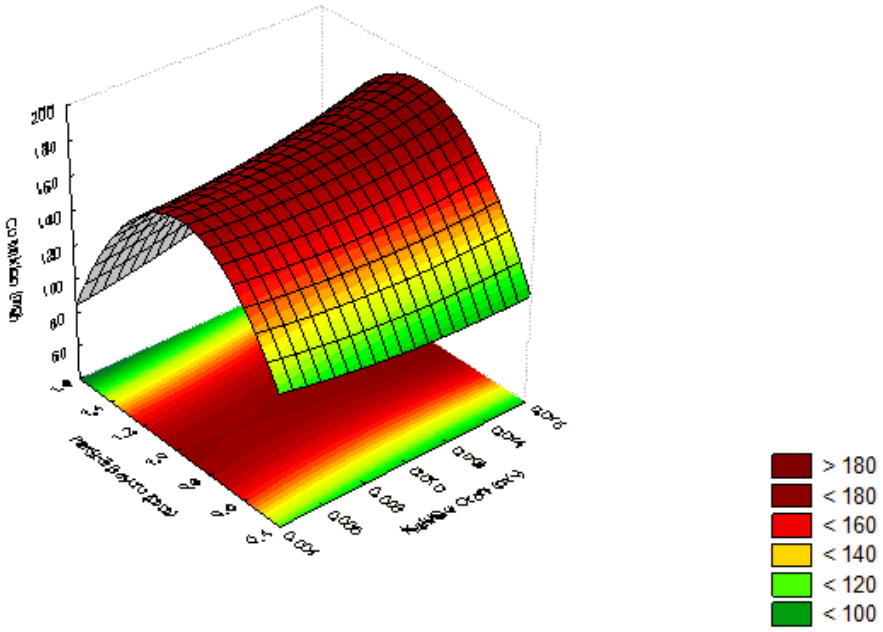


Şekil 7.6b Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen ürünün bakır (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve zaman ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği

Bakır miktarının katı/sıvı oranı ve partikül boyutuna göre değişimini gösteren yanıt yüzey ve iz düşüm grafikleri Şekil 7.7a ve 7.7b'de görülmektedir. Şekillerde görüleceği üzere katsayılara bağlı olarak eş yükselti eğrilerinin eyer şeklindedir (saddle point). Maksimum nokta, minimum nokta (eyer noktası), durgun tepe ya da yükselen/azalan tepe koşullarını verebilmektedir. Yanıt yüzeyinin eyer şeklindeki yüzeyler partikül madde iç etkileşimin önemli olduğunu göstermektedir. Katı/sıvı oranı 0,014-0,016 aralığında bakır miktarı maksimumken, bu değere karşılık gelen partikül boyutu değeri 0,9-1,2 mm'dir.

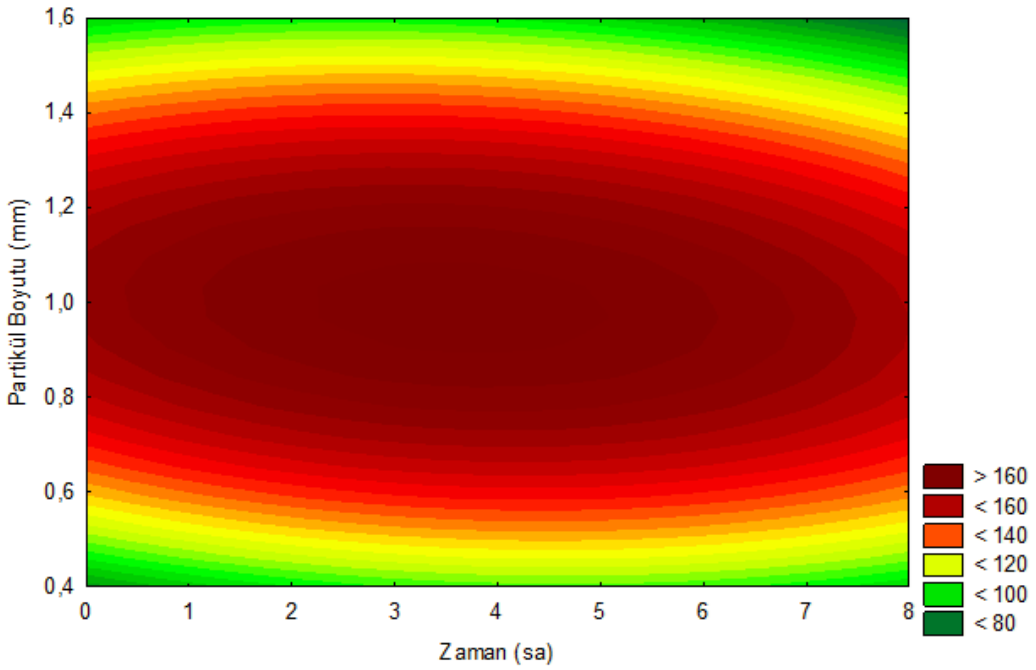


Şekil 7.7a. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen bakır (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve partikül boyutu ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği

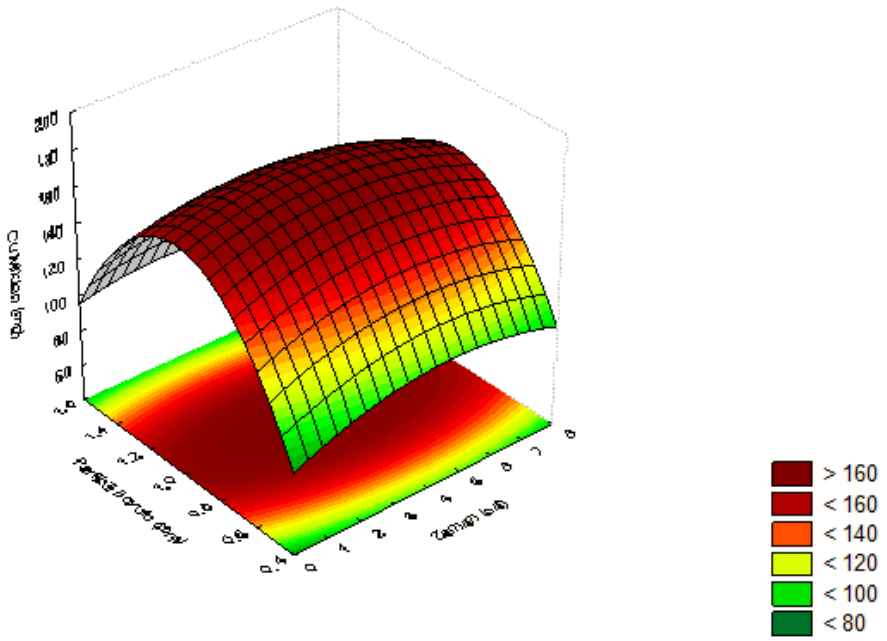


Şekil 7.7b. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen bakır (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve partikül boyutu ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği

Bakır miktarının zaman ve partikül boyutuna göre değişimini gösteren yanıt yüzey ve iz düşüm grafikleri Şekil 7.8a ve 7.8b'de görülmektedir. Bu grafiklerden anlaşılacağı üzere dairesel şekil ile sınırlandırılmış yüzeyde öngörülen en yüksek veya en düşük yanıtı belirtmektedir. Bakır ekstraksiyonunun dönüşümünün en yüksek olacağı zaman aralığı 1,2-6 sa ve partikül boyutu aralığının 0,85-1,1 mm olduğu aralıktır. Merkezden uzaklaştıkça bakır ekstraksiyon veriminde azalma gözlemlenmektedir.



Şekil 7.8a Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen bakır (mg) miktarının, zaman ve partikül boyutu ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği



Şekil 7.8b. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen bakır (mg) miktarının, zaman ve partikül boyutu ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği

7.5. Baskı Devre Kartlarındaki Nikel'in Liç İşlemi İle Çözünmesinin Optimizasyonu

Baskı devre kartların liç işlemi sonunda ICP-OES cihazında nikel miktarı analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında seyreltme oranı (1/100), katı/sıvı oranları dikkate alınarak çözeltiye geçen nikel miktarı (Çizelge 7.8) hesaplanmıştır.

Ön denemeler ile elde edilen demir grafikleri Şekil 7.10, 7.11 ve 7.12'de verilmiştir. Deneyler ortam sıcaklığındadır. Bu yapılan ön deneme sonuçlarından faydalanılarak reaksiyona etki eden bağımsız değişkenlerin değer aralıkları belirlenmiştir. Yüzey merkezcil deney tasarımı ile belirlenen 3 değişkenli ve 3 seviyeli deney deseninin noktaları (kodları ve değerleri ile)Çizelge 7.8'de verilmiştir. Merkez noktasında iki tekrar yapılmıştır.

Çizelge 7.8. Nikel ekstraksiyonunun optimizasyonu için yüzey merkezcil deney tasarımı

Deneyler	Katı/Sıvı Oranı (%m/v)		Zaman (Saat)		Partikül Boyutu (mm)		Yanıt-Nikel Miktarı (mg)
	x_1		x_2		x_3		
	Kod	Değer	Kod	Değer	Kod	Değer	Değer
1	-1	1/200	-1	1	-1	0,355-0,5	0,821±0,46
2	-1	1/200	+1	7	-1	0,355-0,5	0,906±0,49
3	-1	1/200	-1	1	+1	1-2,36	0,338±0,08
4	-1	1/200	+1	7	+1	1-2,36	0,434±0,26
5	+1	1/67	-1	1	-1	0,355-0,5	0,88±0,09
6	+1	1/67	+1	7	-1	0,355-0,5	0,84±0,1
7	+1	1/67	-1	1	+1	1-2,36	0,42±0,03
8	+1	1/67	+1	7	+1	1-2,36	0,21±0,13
9	-1	1/200	0	4	0	0,5-1	1,278±0,7
10	+1	1/67	0	4	0	0,5-1	1,425±0,19
11	0	1/100	0	4	-1	0,355-0,5	0,99±0,19
12	0	1/100	0	4	+1	1-2,36	0,145±0,97
13	0	1/100	-1	1	0	0,5-1	0,923±0,24
14	0	1/100	+1	7	0	0,5-1	1,44±0,22
15	0	1/100	0	4	0	0,5-1	1,585±0,12
16	0	1/100	0	4	0	0,5-1	1,585±0,12
17	0	1/100	0	4	0	0,5-1	1,585±0,12

7.5.1. Farklı Reaksiyon Koşullarında Baskı Devre Kartından Nikel Elementinin Ekstraksiyonunun İstatiksel Açıdan Değerlendirilesi

İstatistiksel analizlerde STATISTICA 8.0 (StatSoft, Inc.) paket programlarından yararlanılarak bağımsız değişkenlere karşılık bağımlı değişken yani yanıt için "ANOVA Analizi" yapılmıştır. 3 değişken, 3 seviye yüzey merkezcil deney tasarımında elde edilen yanıtların değerlendirilmesinde aşağıda verilen 2. dereceden polinom eşitliği kullanılmıştır.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{3} \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{j=i+1}^{3} \beta_{ij} x_i x_j$$

Bu denklemde; β_0, ortalama etki, β_i, β_{ii}, β_{ij} ise sırasıyla değişkenlerin lineer, kuadratik ve etkileşimleri için belirlenen katsayılardır. x_i ve x_j de bağımsız değişkenlerdir. Bağımsız değişkenlerle bağımlı değişken arasındaki ilişkiye bağlı olarak lineer ve kuadratik modellerde etkilerinin tahminleri ve katsayıları alınmıştır. Bu değerler Çizelge 7.9'da verilmiştir.

Çizelge 7.9. Nikel ekstraksiyonun optimizasyonu için bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiye bağlı olarak lineer ve kuadratik modellerde etkilerin tahminleri ve katsayıları

Faktör	Etki	Standart hata	t değeri	p değeri	Katsayı
Sabit	1,43275	0,093006	25,40	0,000001	1,432746
Katı/sıvı oranı (1L)	-0,0004	0,137467	-0,003	0,99776	-0,0002
Katı/sıvı oranı (1Q)	0,06589	0,265577	0,25	0,811185	0,032944
Zaman (2L)	0,08960	0,137467	0,65	0,53534	0,0448
Zaman (2Q)	-0,274	0,265577	-1,03	0,336343	-0,137056
Partikülboyutu (3L)	-0,578	0,137467	-4,2	0,004012	-0,289
Partikülboyutu (3Q)	-1,50211	0,265577	-5,66	0,00077	-0,751056
1L * 2L	-0,10755	0,153692	-0,7	0,505886	-0,053875
1L * 3L	-0,03375	0,153692	-0,22	0,832453	-0,016875
2L * 3L	-0,03975	0,153692	-0,26	0,803358	-0,019875

L : Lineer,

Q : Kuadratik

[a]: $p<0,01$ lineer düzeyinde anlamlı

[b]: $p<0,05$ kuadratik düzeyinde anlamlı

Oluşturulan ve 2. dereceden bir polinom olan model denklem Eşitlik (7.3) aşağıda gösterilmiştir. Bu denklemde bağımsız değişkenler (x_i) için kullanılan semboller, "x_1", "x_2" ve "x_3"'dir. "x_1" katı/ sıvı oranını, "x_2" zamanı ve "x_3" ise partikül boyutunu ifade etmektedir.

Çözünen Nikel İçeriği (mg) =

$$1,432746 - 0,0002x_1 + 0,032944x_1^2 + 0,0448x_2 - 0,137056x_2^2 - 0,289x_3 - 0,751056x_3^2 - 0,053875x_1x_2 - 0,016875x_1x_3 - 0,019875x_2x_3 \quad (7.3)$$

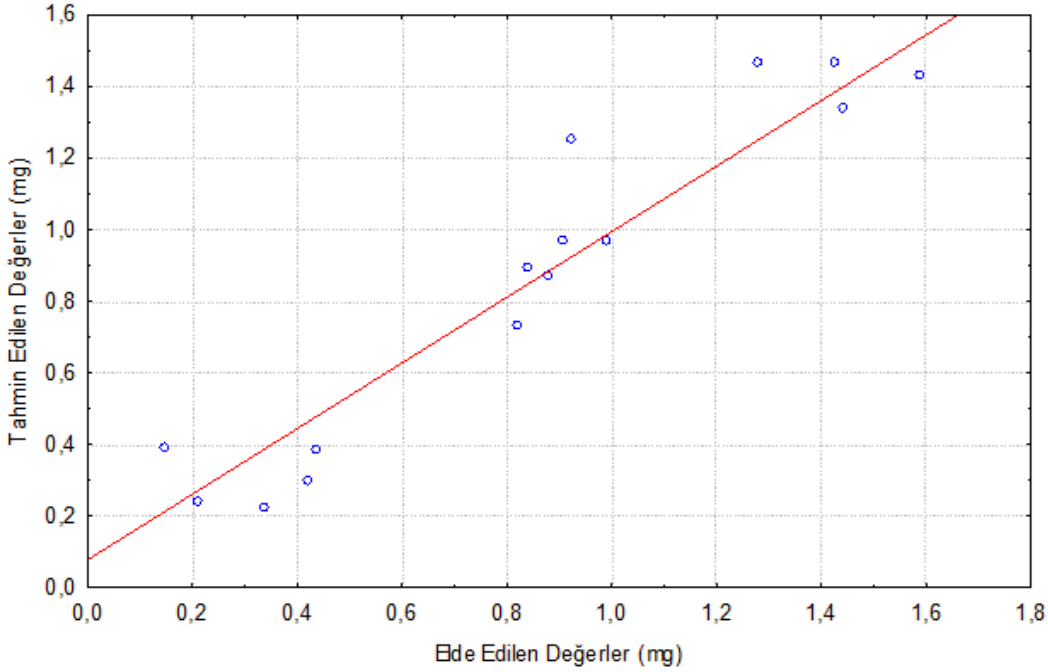
Çizelge 7.9 sonuçları incelendiğinde, partikül boyutunun lineer etkisi $p<0,01$, partikül boyutunun kuadratik etkisinin $p<0,05$. Diğer tüm faktörlerin lineer ve birlikte etkisi $p>0,01$ ve kuadratik etkisi $p>0,05$'dir. Bunun anlamı ise ektraksiyona partikül boyutunun lineer ve kuadratik etkisi daha fazladır. Ancak partikül boyutunun lineer ve kuadratik etkisinin yanıt değerini azaltıcı yöndedir.

Oluşturulan Yanıt yüzey modelinde, katı/sıvı oranını, zamanı ve partikül boyutu olmak üzere 3 farklı bağımsız değişken için gözlenen minimum ve maksimum değerler ile optimum değerler Çizelge 7.10'da görülmektedir.

Çizelge 7.10. Nikel ekstraksiyonu optimizasyonu için bağımsız değişkenlerin minimum, maksimum ve optimum değerleri

Faktör	**Gözlenen minimum Değer**	**Optimum Değer**	**Gözlenen maksimum Değer**
Katı/sıvı oranı	1/200	1/100	1/67
Zaman	1	4,5	7
Partikül boyutu	0,5	0,9	1,5

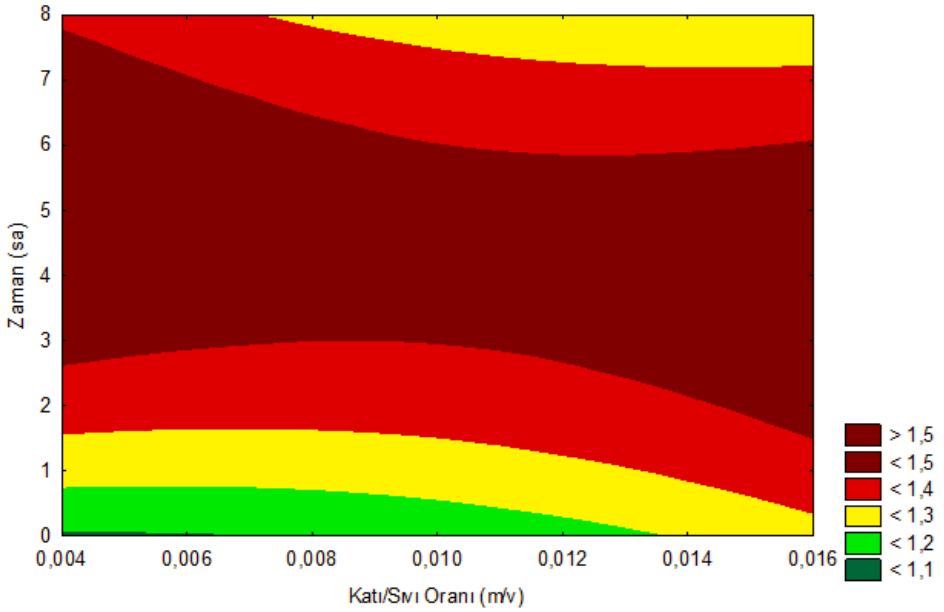
Daha önce elde edilmiş olan model denklemden yararlanarak, gözlenen değerlere karşılık tahmin edilen değerler arasındaki ilişki Şekil 7.9'da verilmiştir. Faktörlerin model denklemde yerine konması ile elde edilen nikel miktarıyla (tahmin edilen değer), deney sonucunda elde edilen veriler (deneysel değerler) arasındaki ilişki büyük oranda lineerlik göstermektedir. Grafikten de görüldüğü gibi korelasyon katsayısının 0,91 olması da bu durumu doğrulamaktadır.



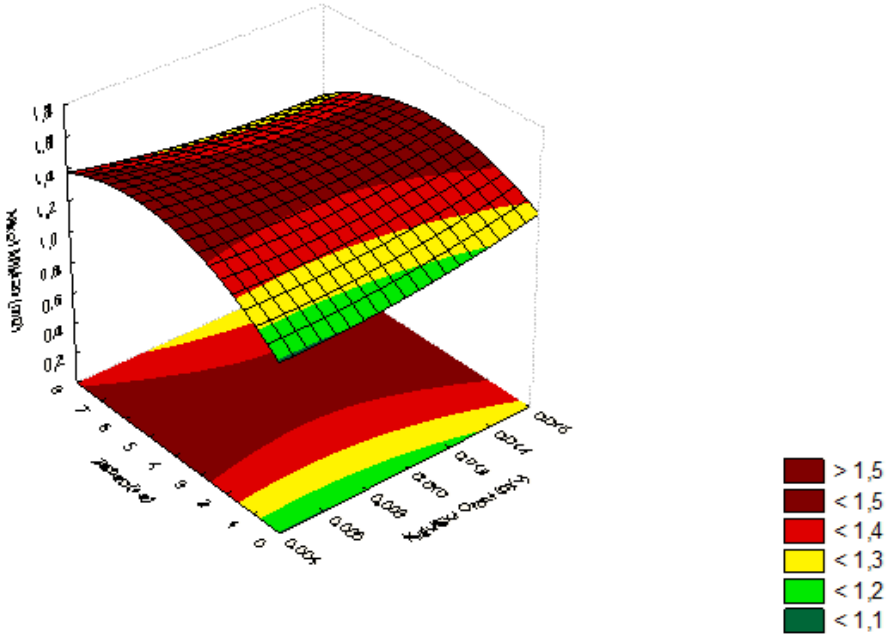
Şekil 7.9. Deneysel olarak elde edilen nikel (mg) değerlerine karşılık model fonksiyondan elde edilen nikel (mg) değerleri arasındaki ilişki

7.5.2. Nikel Miktarının Yanıt Yüzey ve İz düşüm Grafiklerinde Yorumlanması

Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen nikel içeriğinin katı/sıvı oranına ve zamana göre değişimini gösteren iz düşüm (Contour Plot) ve yanıt yüzey grafikleri (Response Surface) Şekil 7.10a ve 7.10b'de görülmektedir. İz düşüm grafiklerinde, denemeler neticesinde elde edilen yanıt değerlerine ait eğriler bir düzlem üzerinde gösterilir. Bu düzleme ait koordinatlar ise bağımsız değişkenlerin seviyelerini göstermektedir. Her bir izdüşüm eğrisi, bağımsız değişkenlere ait seviyelerin bir birleşimi olarak ifade edilen bir düzlemle yüzey arasındaki yüksekliği temsil eden özel bir değere sahiptir. Şekil 7.10a incelendiğinde grafik katsayılara bağlı olarak eş yükselti eğrileri eyer şeklindedir (saddle point). Maksimum nokta, minimum nokta (eyer noktası), durgun tepe ya da yükselen/azalan tepe koşullarını verebilmektedir. Yanıt yüzeyinin eyer şeklindeki yüzeyleri zaman iç etkileşimin önemli olduğunu göstermektedir. Katı/sıvı oranı 0,004-0,016 aralığında nikel miktarı maksimumken, bu değere karşılık gelen zaman değeri 3-6 saat aralığıdır.



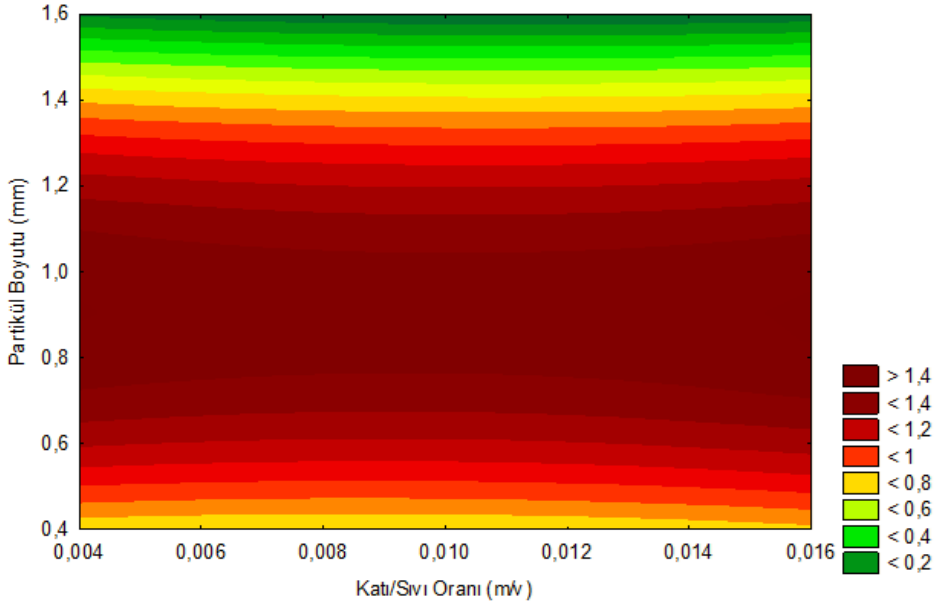
Şekil 7.10 a. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen nikel (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve zaman ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği



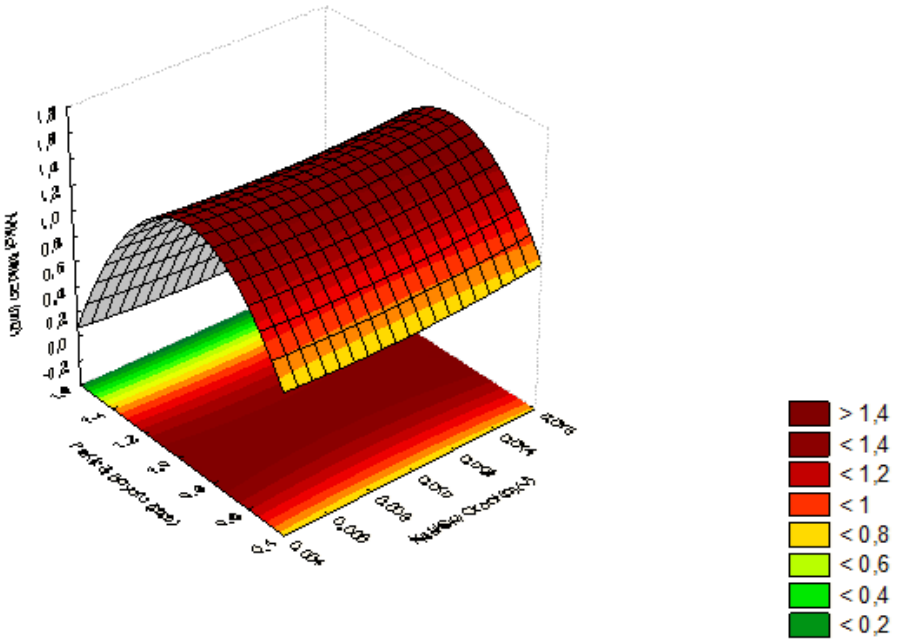
Şekil 7.10b Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen nikel(mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve zaman ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği

Nikel miktarının katı/sıvı oranı ve partikül boyutuna göre değişimini gösteren yanıt yüzey ve iz düşüm grafikleri Şekil 7.11a ve 7.11b'de görülmektedir. Şekillerde görüleceği üzere katsayılara bağlı olarak eş yükselti eğrileri eyer şeklindedir (saddle point). Maksimum nokta, minimum nokta (eyer noktası), durgun tepe ya da yükselen/azalan tepe koşullarını verebilmektedir. Yanıt yüzeyinin eyer şeklindeki

yüzeyleri partikül madde iç etkileşimin önemli olduğunu göstermektedir. Katı/sıvı oranı 0,004-0,016 aralığında nikel miktarı maksimumken, bu değere karşılık gelen partikül boyutu değeri 0,8-1 mm'dir.

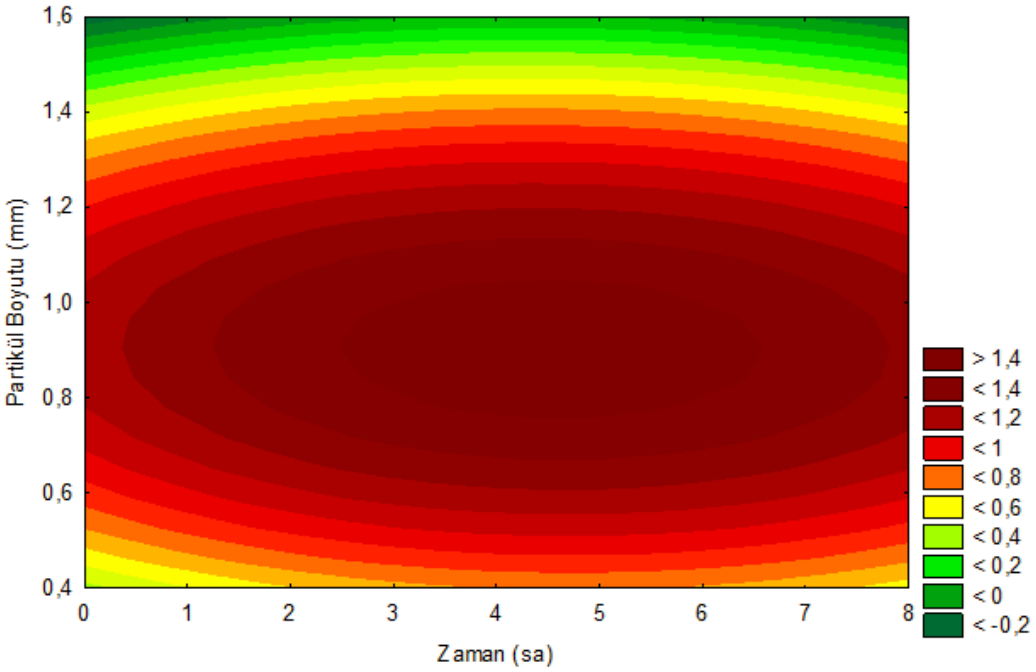


Şekil 7.11a. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen nikel (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve partikül boyutu ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği

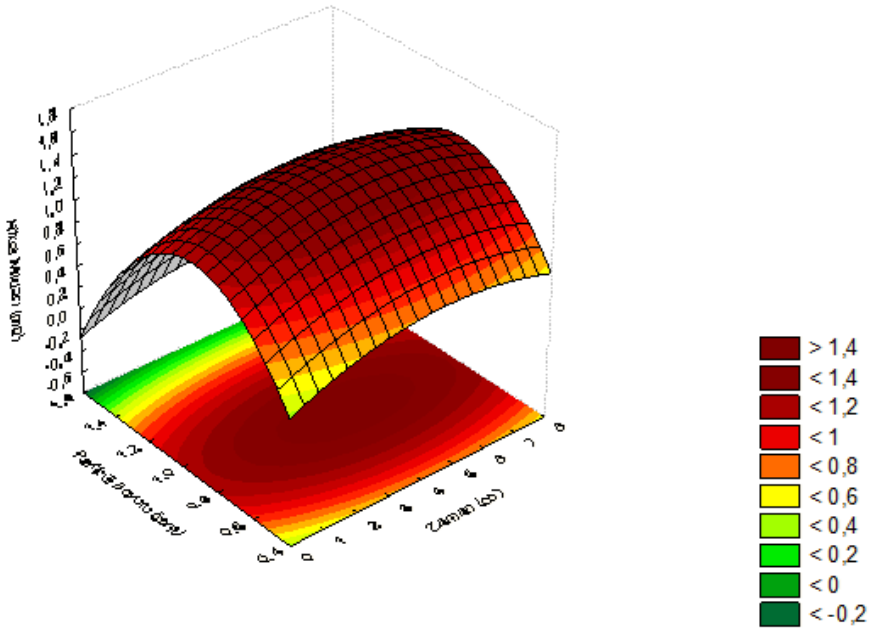


Şekil 7.11b. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen nikel (mg) miktarının, katı/sıvı oranı ve partikül boyutu ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği

Nikel miktarının zaman ve partikül boyutuna göre değişimini gösteren yanıt yüzey ve izdüşüm grafikleri Şekil 7.12a ve 7.12b'de görülmektedir. Bu grafiklerden anlaşılacağı üzere dairesel şekil ile sınırlandırılmış yüzeyde öngörülen en yüksek veya en düşük yanıtı belirtmektedir. Nikel ekstraksiyonunun dönüşümünün en yüksek olacağı zaman aralığı 2,5-6,5 saat ve partikül boyutu aralığı 0,8-1 mm olduğu aralıktır. Merkezden uzaklaştıkça nikel ekstraksiyon veriminde azalma gözlemlenir.



Şekil 7.12a Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen nikel (mg) miktarının, zaman ve partikül boyutu ile değişimini gösteren iz düşüm grafiği



Şekil 7.12b. Baskı devre kartlarının ekstraksiyonu sonucu elde edilen nikel (mg) miktarının, zaman ve partikül boyutu ile değişimini gösteren yanıt yüzey grafiği

7.6. Optimum Değer Aralıkların Yakma ve Filtre Prosesleri İle Doğrulanması

Baskı devre kartların en verimli aralığı 0,5-1 mm partikül boyutunda olduğu yanıt yüzey metodolojisi ile tespit edilmiştir. Yanıt yüzey metodundaki tespitin desteklenmesi adına liç işlemi sonunda filtre kâğıdında biriken (çözünmeyen) malzemeler tartım işlemine tabi tutulmuştur. 0,5 gram numune konularak yürütülen deneylerde işlem öncesi filtre kâğıdı etüvde 105 °C'de 1 saat bekletilip desikatörde kurutma işlemi sonrası tartım yapılmıştır. Süzme işlemi sonrası filtrede çözünmeyen madde miktarını bulmak için etüvde 105 °C'de 1 saat bekletilip desikatörde kurutma işlemi sonrası tartım yapıldı. 1/100 katı/sıvı oranında 4 saat liç işlemine tabi tutulan 3 fraksiyon için çizelgedeki veriler elde edilmiştir.

Çizelge 7.11. Liç işlemi sonundaki filtre kâğıdında biriken madde miktarı

Deney	Partikül Çapı	Filtre kağıt tartım (gram)	Filtre kağıdı + Çözünmeyen madde (gram)	Çözünmeyen madde (gram)	Ortalama Çözünmeyen Madde (gram)
11	0,355-0,5 mm	1,3030	1,5580	0,2550	0,3158±0,053
		1,2810	1,6154	0,3444	
		1,2029	1,5510	0,3481	
12	1-2,36 mm	1,2914	1,6876	0,3962	0,3698±0,023
		1,2728	1,6308	0,3580	
		1,2455	1,6009	0,3554	
15	0,5-1 mm	1,4198	1,6280	0,2082	0,1894±0,018
		1,3574	1,5448	0,1874	
		1,2523	1,4250	0,1727	

15. deneyde 0,5-1 mm aralığında filtre kağıdında çözünmeyen madde oranı diğer iki fraksiyona göre daha az olduğu görülmüştür.11.deneyde 0,355-0,5 mm aralığında çözünme oranı 1-2,36 mm aralığındaki partikül çapına göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Yanıt yüzey metodunda demir, nikel ve bakır için optimum değer aralığı tespit edilen (0,5–1mm) filtre kağıdındaki çözünmeyen madde miktarları karşılaştırıldığında da (0,5–1mm) aralığı en verimli partikül çapı olduğu kanıtlanmıştır.

(0,355-0,5), (0,5-1), (1,2,36) mm partikül çaplarıı için içerisindeki uçucu ve plastik maddelerin giderilmesi ve bu maddeler giderildikten sonra liç veriminde kullanılan madde miktarların etkisinin görülebilmesi için her bir numune 1 gram alınarak ve 3 tekrarlı olmak üzere 700 °C ve 15 dakika koşullarında baskı devre kartı numuneleri fırın içerisinde yakılmıştır.

Çizelge 7.12. Yakma işlemi sonundaki krozede kalan madde miktarı

Partikül çapı (mm)	**Kroze ağırlığı (gram)**	**Kroze+ baskı devre kartı (gram)**	**Kalan baskı devre kartı (gram)**	**Ortalama kalan baskı devre kartı (gram)**
0,355-0,5 mm	28,1150	28,8485	0,7335	0,7503±0,017
	20,7591	21,5095	0,7504	
	26,9493	27,7164	0,7671	
0,5-1 mm	24,5311	25,4179	0,8868	0,8783±0,009
	23,4826	24,3522	0,8696	
	23.1454	24,0240	0,8786	
1-2,36 mm	22,3824	23,1676	0,7852	0,7583±0,026
	27,7985	28,5542	0,7557	
	24,1045	24,8386	0,7341	

1 gram numunenin yakma işlemi sonucunda (0,5-1 mm) aralık için 0,8783 gram, (0,355-0,5 mm) aralık için 0,7503 gram ve (1-2,36 mm) için 0,7583 gram krozede kalan miktarlar tespit edilmiştir. Çizelge 7.12 de verilen yakma sonuçlarına göre yanıt yüzey metodunda tespit edilen optimum aralık (0,5-1 mm) daki kayıp diğer aralıklara göre daha az olduğu tespit edilmiştir.

8.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte hızla artan E-atık, içerdiği temel ve değerli metaller nedeniyle stratejik bir atıktır. E-atık içerisindeki baskı devre kartlarının geri kazanımında günümüze kadar 4 farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden küçük ölçekte uygulanabilen, yüksek metal kazanma verimi ve düşük çevresel kirletici etkisine sahip hidrometalurjik yöntemler diğer yöntemler ile kıyaslandığında daha avantajlıdır.

Bu çalışmada değerli ve temel metallere sahip baskı devre kartlarının liç işlemi ile demir, nikel ve bakır metallerinin geri kazanımı incelenmiştir. Elektronik baskı devre kartlarında metal ekstraksiyonuna etki eden, üç bağımsız değişken faktör, katı/sıvı oranı, zaman ve partikül boyutu etkisinin incelenmesi ve optimum koşulların belirlenmesi amacıyla deneysel tasarımdan yararlanılmıştır. Bu amaçla Yanıt Yüzey Metodolojisi kullanılmıştır. Demir, Nikel ve Bakır metallerin ekstraksiyonunun optimizasyonu için yüzey merkezcil deney tasarımında oluşan şartlarda yürütülen deneyler ortam sıcaklığında ve kral suyu çözeltisi ile gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan yanıt yüzey modelinde, katı/sıvı oranı, zaman ve partikül boyutu olmak üzere 3 farklı bağımsız değişken için Nikel, Demir ve Bakır metallerinin gözlenen optimum değerleri belirlenmiştir.

Demir metali için optimum;

Katı/sıvı oranı: 0,006 g/ml
Zaman: 5,75 saat
Partikül Boyutu: 0,8 mm olarak belirlenmiştir.

En uygun koşullar olarak belirlenen bu koşulların doğruluğunu istatistiksel olarak da irdelemek amacıyla Yanıt Yüzey Metodolojisi optimizasyon yöntemi ile 3 değişken 3 seviye yüzey merkezi deney tasarımı kullanılmış ve bu yönteme göre elde edilebilecek optimum demir içeriği 18,28 mg (regresyon düzeltmesi ile 21,05 mg) olarak bulunmuştur.

Bakır metali için optimum;

Katı/sıvı oranı: 0,0067 g/ml
Zaman: 3,398 saat
Partikül Boyutu: 0,96 mm olarak belirlenmiştir.

En uygun koşullar olarak belirlenen bu koşulların doğruluğunu istatistiksel olarak da irdelemek amacıyla Yanıt Yüzey Metodolojisi optimizasyon yöntemi ile 3 değişken 3 seviye yüzey merkezi deney tasarımı kullanılmış ve bu yönteme göre elde edilebilecek optimum bakır içeriği 176,47 mg (regresyon düzeltmesi ile 189,75 mg) olarak bulunmuştur.

Nikel metali için optimum;

Katı/sıvı oranı: 0,01 g/ml
Zaman: 4,5 saat
Partikül Boyutu: 0,9 mm olarak optimum değer belirlenmiştir.

En uygun koşullar olarak belirlenen bu koşulların doğruluğunu istatistiksel olarak da irdelemek amacıyla Yanıt Yüzey Metodolojisi optimizasyon yöntemi ile 3 değişken 3 seviye yüzey merkezi deney tasarımı kullanılmış ve bu yönteme göre elde edilebilecek optimum nikel içeriği 1,465 mg (regresyon düzeltmesi ile 1,61 mg) olarak bulunmuştur.

Baskı devre kartlarındaki metallerin çözeltiye geçme işleminde kral suyunun etkili bir çözücü olduğu tespit edilmiştir. Fiziksel ve hidrometalurjik yöntemlerin birlikte kullanılmasının liç verimindeki önemli etkisi görülmüştür.

Bu çalışmada fiziksel yöntemdeki kırıcı ünitesi kullanılarak baskı devre kartların etkin partikül boyut çapı tespit edilmiştir. İstenilen metalin yüksek verimde geri kazanımı için fiziksel yöntemde kullanılan metotlar ile plastik malzemenin ayrılması gerektiği tespit edilmiştir.

Bu çalışma ile hidrometalurjik çalışmalarda çözünmeyen madde miktarının ön hazırlık işlemleri veya fiziksel ayrıştırma sistemleri yardımıyla azaltılması gerektiği tespit edilmiştir. Geri kazanımı istenilen metallerin hidrometalurjik aşamaya optimum koşullarda geçmesinde fiziksel ayrıştırma sistemlerin önemli bir etken olduğu görülmüştür.

Heterojen yapıya sahip baskı devre kartlarındaki metallerin geri kazanımı için daha az sayıda ve daha verimli esas deneme yapılmasına olanak sağlayan yanıt yüzey metodolojisi önemli avantajlar sağlamaktadır. Geri kazanımı istenilen metalin etkileşim içinde bulunduğu değişkenler ile kıyaslanmasına olanak sağlayan metotta her bir metal için optimum değerler tespit edilmiştir.

Sabit ağırlıkta (0,5 gram) yürütülen çalışmada ağırlık miktarının minimum sapma miktarını sağlaması için arttırılması gerektiği tespit edilmiştir. Baskı devre kartları liç işleminde 3 değişken içerisinde en etkili değişkenin partikül çapı olduğu ve partikül çapı miktarı azaldıkça çözünme veriminde artış gösterdiği tespit edilmiştir. Baskı devre kartlarından metal geri kazanımı üzerine yapılan deney çalışmalarında demir, nikel ve bakır için farklı partikül çaplarında verimlilik tespit edilmesine rağmen optimum aralık 0,5-1 mm aralığı gözlenmiştir.

Partikül çapı 0,5-1 mm optimum aralığındaki baskı devre kartı parçalarının yüzey alanı artmasından dolayı 1-2,36 mm aralığındaki çapa göre çözünen metal oranı artmıştır. Baskı devre kartlarında 0,355-0,5 mm aralığındaki örnekler yüzey alanı artmasına rağmen çözünme oranında artış gözlenmemiştir. 0,355-0,5 mm aralığındaki örneklerde kırılma işlemi sırasında elekten geçirilen malzeme içerisinde parçalanabilme özelliği daha yüksek olan plastikler metallere göre daha küçük elek aralıklarında bulunduğu için metal çözünme verimi 0,5-1 mm aralığına göre düşük çıkmıştır. Liç işlemi sonunda filtre kağıdında yapılan süzme işlemi sonrası 3 partikül çapına ait deneyler karşılaştırıldığında çözünme verimi yüksek olan 0.5-1mm aralığında çözünen miktar yüksek, filtre kağıdındaki toplam ağırlık en az olurken 0,355-0,5 mm aralığındaki örneklerde plastik miktarının yüksek olmasından dolayı metal çözünme oranı düşüktür.

Farklı partikül çaplarındaki baskı devre kartlarının yakma işlemi sonunda plastik malzemelerin giderilmesi ile liç işleminde etkili partikül çapları doğrulamıştır. 0,355-0,5 mm aralığı 0,5-1 mm aralığına göre yüzey alanı artmasına rağmen içerdiği plastik madde oranı yüksek olmasından dolayı metal çözünme oranı daha azdır. 1-2,36 mm aralığındaki baskı devre kartın yüzey alanın diğer partikül çaplarına göre az, plastik oranın yüksek olmasından dolayı çözünme verimi en az tespit edilmiştir

Ayrıca yapılan deneyler sonucunda çalkalama süresinin etkin bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Yanıt yüzey metodolojisinde demir, nikel ve bakır farklı sürelerde optimum verime ulaşmıştır. Katı/sıvı oranında ise incelenen 3 metal için farklı oranlarda optimum değer tespit edilmiştir.

Öneriler

Çözeltideki çözünmeyen atık oluşumunu azaltması ve hidrometalurjik proses öncesi değerli metal içeriğini arttırmasından dolayı elektronik atıkların geri kazanım çalışmalarında hidrometalurjik yöntemler ile birlikte fiziksel (Boyut küçültme, metal-metal ve metal-plastik ayırma) yöntemlerin kullanılması önerilir.

Heterojen yapıya sahip baskı devre kartlarındaki tüm değişkenler ve metaller, daha az sayıda ve daha verimli deneme yapılmasına olanak sağlayan yanıt yüzey metodolojisi ile incelenmesi sonucunda pirometalurjik araştırmalar ile kıyaslanması önemli bir tespit olacaktır.

KAYNAKLAR

AYDB, Atık Yönetimi Daire Başkanlığı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Elektrikli ve Elektronik Atıkların İşlenmesi İle İlgili Uygun Görüş Verilen Firmalar, http://atikyonetimi.cevreorman.gov.tr

AYGE, 2008, Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik, Resmi Gazete Sayı: 26927,

Basel, http://www.basel.int/

Birgör U., 2009, RoHS Nedir? Yönetmeliği ve Uygulamaları-I, emo, izmir,31

Boyrazlı M., 2001, Bakır konvertör cürufunun dikromatlı ortamda liçinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme mühendisliği ana bilim dalı, Elazığ

Brussels, 2011, Council revises rules on recycling of electronic devices, Council of the European Union

Buğdaycı İ., 2008 , Kloroflorokarbon, Bilim ve Teknik dergisi,11-13

Bulgurcu H., Kon O., İlten N., 2007, Soğutucu akışkanların çevresel etkileri ile ilgili yeni yasal düzenlemeler ve hedefler, VIII. Ulusal tesisat mühendisliği kongresi, 915-928

Cui, J., Forssberg E.,2003 ,Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review, Journal of Hazardous Materials B99 243-263

ÇOB, 2009, PCB ve PCT içeren atıkların yönetimi, Çevre ve Orman Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü

Çığgın T. C., 2006, Elektrikli ve Elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı için tesis konstrüksiyonu ve sistem parametrelerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Makina Mühendisliği, İstanbul,

Deveci H., Yazıcı E.Y., Aydın U., Yazıcı R., Akçıl A.U.,2010 Extraction of copper from scrap tv boards by sulphuric acid leaching under oxidising conditions, Avusturya, Viyana

Directive, 2002/96/EC, 2003. Directive of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Offical Journal of the European Union, 24-38

Doğan C., 2009, Elektrikli ve Elektronik Atık Yönetimi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim dalı,

Dursun O., 2009, E-Atık : tekno felaket, TMMOB elektrik mühendisleri odası, Ankara

EPA, Environmental Protection Agency, http://www.epa.gov/ , Son güncelleme 26 Ocak 2010

Emiroğlu S., 2006, Asbestin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Çevre Mühendisliği Anabilim dalı, Sakarya

Eskici M., 2006, 'Elektronik Hurda ve Baskı Devrelerinden Metal Geri Kazanımına Yönelik Ön İşlemler ve Proses Optimizasyonu' Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Filiz E., 2007, Doğal kaynaklardan elde edilen adsorbanlarla sulardan ağır metal giderimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Goosey M., Kellner R., 2002, A Scoping study: End of life printed circuit boards, intellct and the department of trade and industry,

Gupta M., 2008, Guidelines for enviromentally sound management of e-waste, Delhi Ministry of enviroment – forests central pollution control board

Hagelüken C., Corti W.C., 2009, Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through 'Design for Recycling', 209-220

He W., Li G., Ma X., Wang H., Huang J., Xu M., Huang C., 2006, WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China, Journal of Hazardous Materials, B136 502–512

Herat S., 2008, Environmental impacts and use of brominated flame retardants in electrical and electronic equipment, Environmentalist 28, 348–357

Hyoëtylaëinen T., Hartonen K., 2002, Determination of brominated flame retardants in environmental samples, University of Helsinki, Department of Chemistry, Laboratory of Analytical Chemistry, Helsinki

IARC, 1988, Man-made Fibers and Radon. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans, vol. 43. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer.

Ilgar M., 2010 E-atık küresel sorunlar ve Türkiye'deki durum, Exitcom Recycling,

Irasarri M. L., 2005 Treatment for Waste from Electric and Electronic Equipment

Kaytaz Y., 1990. Cevher Hazırlama, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.

Kinoshita T., Akita S., Kobayashi N., Nii S., Kawaizumi F., Takahashi K., 2003, Metal recovery from non-mounted printed wiring boards via hydrometallurgical processing, Hydrometallurgy 69, 73-79

Koç B., Ertekin F.K., 2009, Yanıt yüzey yöntemi ve gıda işleme uygulamaları, Ege üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir

Li J.H., Gao S, Duan HB, Liu LL., 2009, Recovery of valuable materials from waste liquid crystal display panel. Waste Management, 2033–2039

Madenoğlu H., 2005, Recovery of some metals from electronic scrap, yüksek lisans tezi, Ege üniversitesi, Kimya mühendisliği, İzmir

Masevetas I., Moutsatsou A., Nikolaou E.,Spanou S., Zoikis A., Pavlatou E.A., Spyrellis N., 2009, Production of copper powder from printed circuit boards by electrodeposition, Global nest journal, vol 11, No 2, 241-247

Ogilvie S. M., 2004, WEEE & Hazardous Waste, A report produced for DEFRA

Oh C.J., Lee S.O., 2003, Selective leaching of valuable metals from waste printed circuit boards, Air&waste management 53:897-902

Ongondo F.O., Williams I.D., Cherrett T.J., 2010, How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes, , Waste Management 714–730

Önal G. ve Ateşok G., 1994, Cevher Hazırlama El Kitabı, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayınları, İstanbul.

Öztürk M., 2008, Pil/ Akü Kullanımı ve Atık piller ile akülerin zararları, Ankara

Öztürk M., 2008, Atık motor yağı ve berarafı, Ankara

Özyurt N., 1998, Aladağlar karstik akiferi (Doğu Toroslar) boşalımlarında klorflorokarbon esaslı yeraltı suyu geçiş zamanın belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe üniversitesi, Jeoloji mühendisliği, Ankara

Park Y.J., Fray D.J., 2008, Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards, Journal of hazardous materials 164, 1152-1158

Puckett J, Westervelt S, Gutierrez R, Takamiya Y.,2005, The digital dump. Exporting re-use and abuse to Africa. Report from the Basel Action Network, Seattle,

Qin D., 2007, Decline in the concentrations of chlorofluorocarbons (CFC-11, CFC-12 and CFC-113) in an urban area of Beijing, China, Atmospheric Environment 41, 8424–8430

Robinson H.B., 2009, E-Waste: An assesment of global production and enviromental impacts, Science of the total environment 408 183-191

RoHS, 2002/95/EC**,** 2003. Directive of the European Parliament and of the Councıl of 27 January 2003 on the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, *Offical Journal of the European Union*, 13.02.2003.

Sayman Ü., 2011,Çevre Alanında Kapasite Geliştirme Projesi, AEEE Direktifi, REC bölgesel çevre merkezi, Ankara

TAEK, 2011, Türkiye Atom Enerji Kurumu, Radyasyon Ölçümü ve Radyasyondan korunma Kurs notları

TAKY, 2005, Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, Resmi Gazete Sayı: 25755, Ankara

Tap, http://www.tap.org.tr/, Taşınabilir Pil Üreticileri ve İthalatçıları Derneği,

Tsydenova O., Bengtsson M., 2009, Environmental and Human Health Risks Associated with the End-of-Life Treatment of Electrical and Electronic Equipment, Institute for Global Environmental Strategies, (IGES) Integrated Waste Management and Resource Efficiency Project

Tuncuk A., Stazi V.,Akcil A.,Yazici E.Y.,Deveci H.,2011, Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling, Minerals Engineering, 28-37

Turan M.D., Altundoğan H.S., 2011, Hidrometalurjik araştırmalarda yanıt yüzey yöntemlerinin kullanımı, madencilik cilt 50, sayı 3, 11-23,

Uğur Metal, 2011, Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya İşlem tesisi, Çevre Yönetim birimi

Ünsal M., 2010, Kesikli proseste biyodizel üretiminin optimizasyonu ve en uygun teknikle üretilmesi, Doktora tezi, Gebze Yüksek teknoloji Enstitüsü Çevre mühendisliği anabilim dalı, Gebze-Kocaeli

Veglio F., Quaresima R.., Fornari P., Ubaldini S., 2002, Recovery of valuable metals from electronic and galvanic industrial wastes by leaching and electrowinnşng, Waste management 23 , 245-252

Veit H. M., Bernardes A.M., Ferreira J.Z., Tenorio J.A.S., Malfatti C.F., 2006, Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing electrmetallurgy, Journal of hazardous materials b137 1704-1709

Widmer R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., Böni, H., 2005, Global perspectives on e-waste. Environmental Impact Assessment Review 25, 436–458.

White C.D., Masanet, E., Rosen, C.M., Beckman, S.L., 2003 Product recovery with some byte: an overview of management challenges and enviromental consequences in reverse manufacturing fort he computer industry, Journal of Cleaner Production, 11, 445-458

Yang H., Liu J., Yang J., 2011, Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards, Journal of hazardous materials 187 , 393-400

Yazıcı E.Y., Deveci H.,2009 'E-Atıklardan Metallerin Geri Kazanımı' Madencilik, cilt 48, sayı 3, 3-18

Zhang S. and Forssberg, E., 1997, Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap, Resources, Conservation and Recycling, 21, 247-269.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında İstanbul'da doğan Cihan İLÇİN, ilk ve orta öğrenimini Kozyatağı İlköğretim okulunda, lise öğrenimini ise Suadiye lisesinde tamamladıktan sonra 2004 yılında Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'nde okumaya hak kazandı. 2008 yılında Sakarya Üniversitesi'nden mezun oldu ve aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2010 Şubat ayından 2011 Aralık ayına kadar Uğur Metal elektrikli ve elektronik atık geri dönüşüm firmasında Çevre Mühendisi olarak görev yapmıştır.