



**ELEKTRİKLİ-ELEKTRONİK ATIKLARIN
GERİ DÖNÜŞÜMÜNDE
YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Cansu DUMAN

Eskişehir 2019

**ELEKTRİKLI-ELEKTRONİK ATIKLARIN GERİ DÖNÜŞÜMÜNDE
YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ**

Cansu DUMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Zerrin GÜNKAYA

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos, 2019

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Cansu DUMAN'ın "ELEKTRİKLİ-ELEKTRONİK ATIKLARIN GERİ DÖNÜŞÜMÜNDE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ" başlıklı tezi 21/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği" nin ilgili maddeleri uyarınca, Çevre Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı):	Dr. Öğr. Üyesi Zerrin GÜNKAYA
Üye:	Prof. Dr. Müfide BANAR
Üye:	Doç. Dr. Demet TOPALOĞLU YAZICI

Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ÖZET

ELEKTRİKLİ-ELEKTRONİK ATIKLARIN GERİ DÖNÜŞÜMÜNDE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Cansu DUMAN

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Teknolojileri

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2019

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zerrin GÜNKAYA

Bu tezde, bir bir atık elektrikli elektronik eşya türü olan BDK'lardan pirometalurjik, hidrometalurjik ve pirolitik-biometalurjik geri dönüşüm yöntemleriyle 1 kg bakır geri kazanımının çevresel etkileri yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemiyle belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler yurtdışında uygulanan yöntemler olup henüz ülkemizde böyle geri dönüşüm yöntemleri bulunmamaktadır. Pirolitik-biometalurjik yöntem ise laboratuvar ortamında uygulanan bir yöntemi oluşturmaktadır. Karşılaştırma, SimaPro 8.5 yazılımı kullanılarak CML IA Baseline yöntemine göre; fosil yakıt bazlı abiyotik kaynakların tükenmesi, küresel ısınma potansiyeli, insanlara olan toksik etki potansiyeli, deniz ortamına ekotoksikite potansiyeli, fotokimyasal oksidasyon potansiyeli ve asidifikasyon potansiyeli etki kategorileri açısından yapılmıştır. Sonuçlar en yüksek etkinin pirolitik-biometalurjik yöntemden kaynaklandığını ve buna da büyük oranda elektrik üretiminin neden olduğunu göstermiştir. Deneysel yöntem olan pirolitik biometalurjik geri dönüşüm yönteminin geliştirilmesi durumunda çevresel etkilerin azaltılmasıyla beraber yardımcı materyal olan portakal kabuğunun biyosorbent olarak kullanılmasıyla endüstriyel simbiyoz da sağlanabilecektir.

Anahtar Sözcükler: Bakır, Baskılı devre kartı, Elektronik atık, Yaşam döngüsü değerlendirilmesi

ABSTRACT

LIFE CYCLE ASSESMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC WASTE OF THE RECYCLE

Cansu DUMAN

Department of Environmental Engineering Programme in Environmental
Technologies

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August, 2019

Supervisor: Dr. Zerrin GÜNKAYA

In this thesis, the environmental effects of 1 kg copper recycling from the printed circuit board which is a waste electrical electronic equipment type by pyrometallurgical, hydrometallurgical and pyrolytic-biommetallurgical recycling methods were determined and compared by life cycle assessment method. Pyrometallurgical and hydrometallurgical methods are applied abroad and there aren't such recycling methods in our country yet. Pyrolytic-biommetallurgical method is a method applied in the laboratory. The comparison was performed using SimaPro 8.5 software according to CML IA Baseline method for the impact categories of depletion of fossil fuel based abiotic sources, global warming potential, human toxicity potential, marine ecotoxicity potential, photochemical oxidation potential and acidification potential effect categories. The results showed that the highest effect was caused by pyrolytic-biommetallurgical method and this was mainly caused by electricity generation. In the case of the development of the experimental method, pyrolytic biommetallurgical recycling method, industrial symbiosis can be achieved by using the orange peel, which is the auxiliary material, as well as reducing the environmental effects.

Keywords: Copper, Electronic waste, Life cycle assesment, Printed circuit boards,

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı;

Akademik ve kişisel anlamda gelişimime katkı sağlayan, yüksek lisans eğitimim boyunca kıymetli vaktini, yardım ve hoşgörüsünü esirgemeyen, değerli bilgileri ve yönlendirmeleriyle çalışmamın ortaya çıkmasını sağlayan başta danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üy. Zerrin GÜNKAYA'ya ve değerli hocalarım Prof. Dr. Müfide BANAR ve Doç. Dr. Aysun ÖZKAN'a;

Çalışmamın ilerlemesine bilgi paylaşımları ile yön veren Aurubis AG ve Boliden Commercial AB and Boliden Smelters şirketlerine;

Hayatımın her aşamasında beni destekleyen, varlıklarıyla güç bulduğum, bana olan güvenleri, gösterdikleri sevgi ve anlayışları için annem Hayriye DUMAN, babam Hüsnü DUMAN ve kardeşlerime;

Bu uzun süreçte beni destekleyerek gösterdiği sabır, ilgi ve yardımları için sevgili yol arkadaşım eşime;

En içten teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos, 2019

Cansu DUMAN

21/08/2019

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı” yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Cansu DUMAN

İÇİNDEKİLER TABLOSU

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİKLİ- ELEKTRONİK ATIKLAR VE GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ	3
2.1. Elektronik Atıkların Kategorileri.....	3
2.2. Elektronik Atıklardaki Maddeler ve Çevre ve Sağlık Etkileri	5
2.3. Türkiye’de AEEE’ler ve Ulusal Mevzuat	10
2.4. Dünya’da AEEE’ler ve Uluslararası Mevzuat	11
2.5. Elektrikli Elektronik Atıkların Geri Dönüşüm Yöntemleri.....	12
2.5.1. Endüstriyel geri dönüşüm yöntemleri.....	13
2.5.1.1.Pirometalurjik yöntem.....	13
2.5.1.2. Hidrometalurjik yöntem	14
2.5.2. Laboratuvar ortamında geri dönüşüm yöntemleri.....	15
2.5.2.1. Biyometalurjik yöntem	15
2.5.2.2. Vakum pirolizi	16
2.5.2.3. Savurmalı ayırma ve vakum pirolizi	16
2.5.2.4. Vakum pirolizi ve mekanik proses.....	17
2.5.2.5.. Süperkritik akışkan.....	17
2.5.2.6. Mekanik fiziksel ayırma yöntemi.....	18
3. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ	20

3.1. Amaç ve Kapsam	25
3.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi	27
3.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi.....	30
3.4. Sonuçların Yorumlanması.....	32
4. KONU İLE İLGİLİ LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR	33
5. LCA UYGULAMASI	39
5.1. Hedef ve Kapsam Tanımı	39
5.1.1. Sistemlerin tanıtımı	39
5.1.1.1. Peirce Smith geri dönüşüm yöntemi	39
5.1.1.2. Kayser geri dönüşüm yöntemi.....	39
5.1.1.3. Pirolitik-biometalurjik geri dönüşüm yöntemi.....	45
5.1.2. Sistem sınırları	47
5.1.3. Paylaştırma prosedürü	47
5.2. Envanter Analizi.....	48
5.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi	50
5.4. Sonuçlar	50
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
KAYNAKÇA	58
ÖZGEÇMİŞ	

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. AEEE'lerin sınıflandırılması.....	3
Tablo 2.2. Dört ayrı AEEE grubunun bileşimi.....	5
Tablo 2.3. AEEE'lerdeki tehlikeli maddeler, buldukları yerler ve çevre ve insan sağlığına etkileri.....	6
Tablo 2.4. AEEE toplama hedefleri.....	11
Tablo 2.5. Bazı ülkeler için kişi başı oluşan AEEE miktarı.....	11
Tablo 3.1. Çevresel endişeler.....	24
Tablo 3.2. Çevresel endişeler ile bağlantılı hedef faaliyetler.....	24
Tablo 3.3. LCA çalışmasında fonksiyon, fonksiyonel birim, LCA sonuçları arasındaki bağlantı.....	26
Tablo 5.1. Peirce Smith geri dönüşüm yöntemine ait birincil veriler.....	48
Tablo 5.2. Kayser geri dönüşüm yöntemine ait birincil veriler.....	49
Tablo 5.3. Pirolitik biometalurjik geri dönüşüm yöntemine ait birincil veriler.....	49
Tablo 5.4. BDK'dan Cu geri dönüşüm yöntemlerinin farklı normalizasyon yöntemleriyle değerlendirilmesi.....	51
Tablo 5.5. BDK'dan bakır geri dönüşüm yöntemlerinin karakterizasyon sonuçları.....	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1.	BDK içeriği..... 5
Şekil 2.2.	Korona elektrostatik ayırma diyagramı..... 19
Şekil 3.1.	Fiziksel bir ürünün yaşam döngüsü..... 20
Şekil 3.2.	ISO 14040'dan uyarlanmış, yaşam döngüsü değerlendirmesi genel yapısı.....21
Şekil 3.3.	ISO 14040 üretim sistemi ve sistem sınırları örneği..... 27
Şekil 3.4.	Bir yaşam döngüsü envanter analizinin bileşenleri..... 28
Şekil 5.1.	Peirce Smith geri dönüşüm yöntemi akım şeması..... 40
Şekil 5.2.	Peirce Smith dönüştürücünün şematik görüntüsü..... 41
Şekil 5.3.	Boliden Rönsskar tesisi akım şeması..... 42
Şekil 5.4.	Kayser geri dönüşüm yöntemine ait fırının şematik görüntüsü..... 43
Şekil 5.5.	Kayser geri dönüşüm yöntemine ait akım şeması..... 44
Şekil 5.6.	Aurubis firmasında kullanılan Kayser geri dönüşüm yöntemine ait akım şeması..... 45
Şekil 5.7.	Pirolitik-biometalurjik geri dönüşüm yöntemi akım şeması..... 46
Şekil 5.8.	Sistem sınırları..... 47
Şekil 5.9.	Atık BDK'dan Cu geri dönüşüm yöntemlerinin karakterizasyon sonuçlarının etki kategorilerine göre yüzde dağılımı..... 52
Şekil 5.10.	Peirce Smith geri dönüşüm yöntemindeki proseslerin etki kategorilerine göre yüzde dağılımı..... 53
Şekil 5.11.	Kayser geri dönüşüm yöntemindeki proseslerin etki kategorilerine göre yüzde dağılımı..... 54
Şekil 5.12.	Pirolitik biometalurjik geri dönüşüm yöntemindeki proseslerin etki kategorilerine göre yüzde dağılımı..... 55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AP	: Asidifikasyon Potansiyeli
AEEE	: Atık elektrikli elektronik eşya
AB	: Avrupa Birliği
BDK	: Baskılı devre kartı
BFR	: Brominated flame retardant (Bromlu alev geciktirici)
C ₂ H ₄	: Etilen
CF	: Karakterizasyon Faktörü
CFCs	: Kloroflorokarbon bileşikleri
CME	: Chicago Mercantile Exchange (Chicago Ticaret Borsası)
CO ₂	: Karbondioksit
CRT	: Cathode Ray Tube (katot ışın tüpü)
Cu	: Bakır
CuSO ₄	: Bakır sülfat
EAGD	: Elektronik Atıkların Geri Dönüşümünü Destekleme Derneği
EEE	: Elektrikli Elektronik Eşya
Fe	: Demir
Fe ₂ O ₃	: Demir oksit
FOP	: Fotokimyasal Oksidasyon Potansiyeli
HBr	: Hidrojen bromür
HC	: Hidrokarbonlar
HCFC	: Hidrokloroflorokarbonlar
HFC	: Hidroflorokarbonlar
HFR	: Halogenated Flame Reterdant (Halojenli alev geciktirici)
HNO ₃	: Nitrik asit
ICP-OES	: Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (İndüktif Olarak Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi)
ISO	: Internatiol Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu)
IT	: Bilgi Teknolojisi
kg Sb ed.	: kg antimon eşdeğeri
kg DCB ed	: 1.4-diklorobenzen eşdeğeri

KRS	: Kayser geri kazanım sistemi
kV	: Kilovolt
LCA	: Life Cycle Assesment (Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi)
LCD	: Liquid crystal display (LCD ekran)
LCI	: Life Cycle Inventory (Yaşam döngüsü envanteri)
LCIA	: Life Cycle Impact Assesment (Yaşam döngüsü etki değerlendirme)
LME	: Londra Metal Exchange (Londra Metal Borsası)
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü)
ÖP	: Ötrofikasyon Potansiyeli
PBB	: Poli bromlu bifenil
PBDD	: Polibromlanmış dibenzodioksin
PBDE	: Poli bromlu difenil eteril
PCB	: Poliklorlanmış bifeniller
PCBs	: Printed Circuit Boards (Baskılı devre kartı)
PCDFs	: Poliklorlanmış dibenzofuranlar
PO ₄	: Fosfat
PV	: Fotovoltaik
PVC	: Polivinil kloridler
PWBs	: Printed Wire Boards (Baskılı yazılım kartları)
RoHS	: Restriction of Hazardous Substances (Tehlikeli Maddelerin Sınırlandırılması Direktifi)
Rpm	: Rounds per minute (Dakikadaki devir sayısı)
SHFE	: Shanghai Futures Exchange (Şangay Vadeli İşlem Borsası)
SO ₂	: Kükürt dioksit
TBBPA	: Tetrabromobisfenol-A
TBRC	: Top Blown Rotary Converter (Üst üflemlili döner dönüştürücü)
TCDD	: Tetrakloridbezo-p-dioksinler
TRACI	: Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts
TÜBİSAD	: Türkiye Bilişim Sanayicileri Derneği
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
WEEE	: Waste Electrical and Electronic Equipment

WISE : Work Integration Social Initiatives (Çalışma Entegrasyonu Sosyal Girişimleri)



1. GİRİŞ

Günümüzde hızla gelişen teknoloji, elektrikli elektronik eşya (EEE) tüketimindeki artışı da beraberinde getirmektedir. Buzdolabı, soğutucular, iklimlendirme cihazları, büyük beyaz eşyalar, televizyon ve monitörler, bilişim ve telekomünikasyon ve tüketici ekipmanları, aydınlatma ekipmanları, küçük ev aletleri, oyuncaklar, spor ve eğlence ekipmanları, izleme ve kontrol aletleri EEE kategorilerini oluşturmaktadır. Bu kategorilerdeki eşyalar, kullanım ömrünü tamamladığında içerdiği bütün bileşenler ile birlikte atık elektrikli elektronik eşya (AEEE) olarak tanımlanmaktadır.

AEEE'ler demir, demir dışındaki metaller, plastik, cam ve diğer materyallerden oluşur. Bu materyaller arasında, bromlu alev geciktiriciler (BFR), hidrokarbonlar (HC), hidroflorokarbonlar (HFC), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC), kloroflorokarbonlar (CFC), poliklorlu bifeniller (PCB), baryum, berilyum, kadmiyum, kobalt, kurşun, lityum, civa gibi toksik bileşenler mevcuttur. Bu toksik bileşenlerin kullanımının azaltılması amacıyla 27 Ocak 2003 tarihinde Avrupa Konseyi tarafından 2002-95-EC numaralı Tehlikeli Maddelerin Sınırlandırılması (Restriction of Hazardous Substances -RoHS) Direktifi kabul edilmiştir. AEEE'lerin yapısındaki bu toksik bileşenlerin insan ve çevre sağlığına yönelik tehdit oluşturmasını önlemek ve diğer materyallerin geri kazanılarak kaynakların korunmasını sağlamak açısından geri dönüşüm önemlidir.

AEEE'ler içerisindeki baskılı devre kartları (BDK) bünyesinde ekonomik değeri yüksek nadir elementler mevcuttur. Bu elementlerin geri dönüşümü pirometalurjik, biyometalurjik, hidrometalurjik ve mekanik prosesler ile sağlanmaktadır. Pirometalurjik proseste atıklar yüksek sıcaklıktaki fırın içerisinde eriyik hale getirildikten sonra değerli metallerin geri dönüşümü sağlanmaktadır. Biyometalurjik proseste, materyal geri dönüşümü için biyoliç ve biyolojik soğurulma yöntemleri kullanılmaktadır. Hidrometalurjik proses ise, atıkların asit ya da kostik ile liçlenmesi ve ayrılıp saflaştırılması esasına dayanmaktadır. Mekanik geri dönüşüm yöntemi olan corona elektrostatik ayırma, metal ve metal dışındaki malzemeler arasındaki yoğunluk ve elektrik iletkenliği arasındaki farka bağlı olarak geri dönüşüm sağlanır (Xu vd., 2007).

BDK'lardan değerli metallerin geri dönüşürüldüğü bu yöntemlerinde içerdikleri prosesler nedeniyle çevresel etkileri bulunmaktadır. Bu çevresel etkilerin belirlenmesinde Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment- LCA) faydalı bir yöntemdir. LCA, International Organization for Standardization (ISO) 14040 - 14044

standartlarını esas alarak bir ürünün, hizmetin veya prosesin tüm çevresel etkilerini beşikten mezara kadar değerlendiren bir yöntemdir.

Bu tezde bir AEEE türü olan BDK'lardan pirometalurjik, hidrometalurjik ve pirolitik-biometalurjik geri dönüşüm yöntemleriyle bakır eldesinin çevresel etkileri LCA yöntemiyle belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler yurtdışında uygulanan yöntemler olup henüz ülkemizde böyle bir AEEE geri dönüşüm yöntemi bulunmamaktadır. Pirolitik-biometalurjik yöntem ise laboratuvar ortamında uygulanan bir yöntemi oluşturmaktadır.



2. ELEKTRİKLİ-ELEKTRONİK ATIKLAR VE GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ

Teknolojinin gelişmesi, alım gücünün artması, elektrikli elektronik ekipmanların tamirinin yeni ürün fiyatına yakın olması gibi sebeplerle AEEE miktarında her geçen yıl bir artış meydana gelmektedir.

AEEE'lerin çeşitliliği ülke ekonomisine göre değişkenlik gösterebilmektedir. AEEE içerisinde pek çok özellikte materyal bulunmaktadır. Bu materyallerin sağlığa ve çevreye zararlı etkileri olabilmektedir. Zararlı etkileri en az seviyeye indirmek için dünya genelinde kontrollü geri dönüşüm yöntemlerinin uygulanması hedeflenmektedir. AEEE'lerden materyal geri dönüşümü ile ülke ekonomisine katkı sağlanmaktadır.

2.1. Elektronik Atıkların Kategorileri

AEEE'ler bilgisayar bileşenleri, telekomünikasyon araçları ve endüstriyel elektronik cihazlar olarak üçe ayrılmakta olup, detaylı sınıflandırma Tablo 2.1'de verilmiştir (Rao vd., 2016).

Tablo 2.1. AEEE'lerin sınıflandırılması

Kategori	Ürünler
Büyük ev aletleri	Buzdolabı ve soğutucular, gıdaların korunması ve depolanması için diğer ekipmanlar, çamaşır makineleri, kurutucular, bulaşık makineleri, yemek pişirme ocakları, elektrikli ocaklar, mikrodalga fırınlar, ısıtma cihazları, elektrikli radyatörler, fanlar, egzoz, havalandırma ve iklimlendirme ekipmanları
Küçük ev aletleri	Elektrikli süpürgeler, halı temizleme makineleri, tekstil ekipmanları, ütüler, tost makineleri, kızartıcılar, öğütücüler, kahve makineleri, elektrikli bıçaklar, tıraş makineleri, saç kurutma makineleri, diş fırçaları, masaj ve kişisel bakım aletleri, dijital saatler, teçhizat ölçme cihazları
Oyuncak, hobi ve spor ekipmanları	Elektrikli trenler, yarış setleri, oyun konsolları, video oyunları, bisiklet, dalış, kürek çekme ekipmanları vs., spor aletleri, para slot makineleri
Elektrikli elektronik aletler (Büyük ölçekli hareketsiz ekipmanlar)	Matkaplar, testereler, dikiş makineleri, freze tezgahları, zımparalama, katlama, bükme, çivileme aletleri, lehimleme, kaynak aletleri, biçme ve diğer bahçe aletleri
Tıbbi cihazlar (implante edilmiş ve enfekte olanlar hariç)	Radyoterapi cihazları; kardiyoji, diyaliz, pulmoner vantilatörler, nükleer tıp, laboratuvar, teşhis ekipmanları, dondurucular, test ekipmanları, izleme ekipmanları
İzleme ve kontrol aletleri	Duman dedektörleri, ısıtma regülatörleri, termostat, ölçme, tartma veya ev aletleri, laboratuvar ekipmanı, diğer izleme aletleri (örneğin; kontrol panelleri, vs.)
Otomatik dağıtıcılar	Otomatik içecek dağıtıcılar, sıcak-soğuk kutu ve şişe içecek dağıtıcıları, para otomatları, ev aletleri

Tablo 2.1. (Devam). AEEE'lerin sınıflandırılması

IT ve Telekomünikasyon ekipmanları	Merkezi veri işleme cihazları, kişisel bilgisayarlar, dizüstü bilgisayarlar, yazıcılar, kopyalama ekipmanları, daktilolar, hesap makineleri, sunum cihazları, faks makineleri, telefonlar, telesekreter sistemleri, ses ve görüntü cihazları
Tüketici Elektroniği	Radyo setleri, televizyonlar, video kameralar, video kayıt cihazları, dijital kameralar, Hi-fi kaydediciler, ses veya resim çoğaltma cihazları, dağıtıcılar

Tablo 2.1'de verilen sınıflandırmadan da anlaşılacağı üzere, AEEE'lerin kompozisyonu çok çeşitli olup, ürüne göre farklılık göstermektedir. AEEE'ler, 1000'den fazla bileşen içerir ve bu bileşenlere göre tehlikeli ve tehlikesiz olarak ayrılırlar. Elektronik atıkların kompozisyonu genel olarak altı kategori altında sıralanabilir;

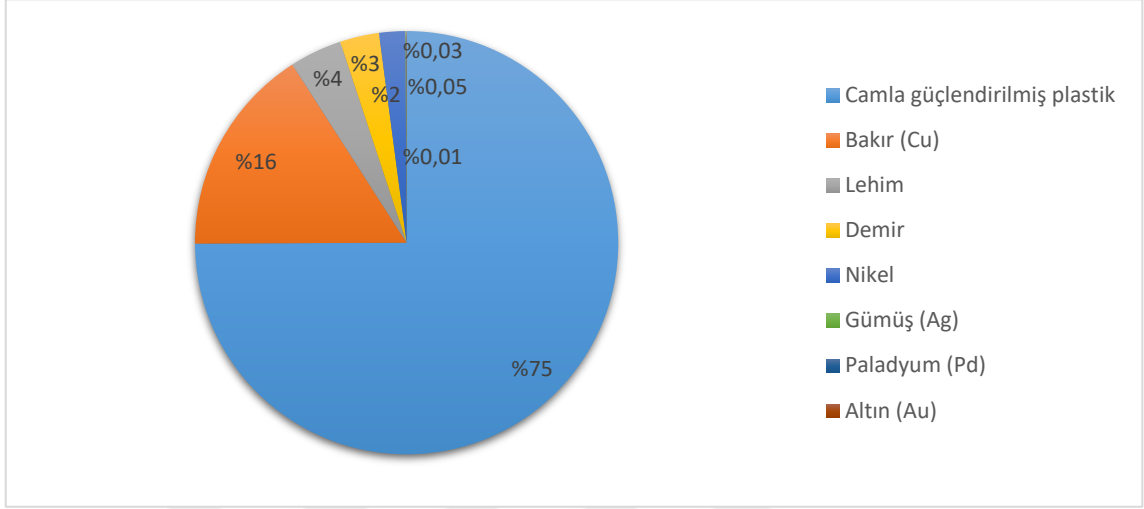
- Demir ve çelik: Muhafazalar ve çerçeveler için kullanılır
- Demir dışı metaller: Özellikle kablolarda bakır ve alüminyum kullanılır.
- Camlar: Ekranlar için kullanılır.
- Plastik: Kasa, kablo ve devre kartlarında kullanılır.
- Elektronik bileşenler
- Diğerleri (kauçuk, ahşap, seramik, vb.) (Rao vd., 2016).

Demir ve çelik elektronik atıkların yaklaşık olarak %50'sini oluştururken, plastiklerin, demir dışı metaller ve diğer bileşenlerin payları ise sırasıyla %21, %13 ve %16'dır. Demir dışı metaller bakır, alüminyum ve gümüş, altın, platin, paladyum gibi değerli metallere oluşur. Kurşun, civa, arsenik, admiyum, selenyum, hexavalent krom, sınır miktarların üzerindeki alev geciktiricilerin bulunması durumunda tehlikeli atık olarak sınıflandırılırlar.

AEEE'lerin temel bileşenlerinden birisi de AEEE içerisinde %6 oranında bulunan baskılı devre kartları (BDK)'lardır. BDK'ları oluşturan materyaller ve içerikleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Orijinal kart materyali bakalittir ancak modern kartlarda birbirine epoksi ile bağlı olan dokuma cam elyafı kullanılmaktadır. Kartın sertliği ve mukavemeti, cam elyafların sıcaklık ve basınç ile erimesi ve birbirine yapışması ile sağlanır. Bu materyaller organik bileşikler olarak düşünülebilir çünkü epoksiler üzerindeki karbon bileşikleri canlıdır. Kartlarda kullanılan en temel materyal ise alev geciktiricilerdir (Printed Circuit Boards (PCBs), 2008).

BDK'lar oldukça kompleks bir yapıya sahip olup özel kimyasallar ve kıymetli metaller içerir. Bu materyaller atık su, solüsyonlar ve katı atıklar aracılığıyla çevreye nüfuz eder. Uzun yıllar yapılan araştırmalar sonunda akademik çevre, araştırma

enstitüleri ve geri kazanım endüstrisi pek çok kıymetli kaynağı tanımlayabilmiş ve bu kaynakların geri kazanımı ile ticari ölçekte büyük başarı sağlanmıştır (Printed Circuit Board Recycling Methods, 2012).



Şekil 2.1. BDK içeriği (Hadi vd., 2015)

2.2. Elektronik Atıklardaki Maddeler ve Çevre ve Sağlık Etkileri

E-atıklar yüzlerce farklı materyalden oluşur. Bu materyaller toksik veya yüksek değerli olabilir. Demir, alüminyum, plastik, cam ağırlığı %80'in üzerindeyken değerli ve toksik materyaller küçük miktardadır ancak yüksek öneme sahiptir. Materyal bileşimi farklı ürünler olsa da birbirine benzerdir ancak kullanım oranları oldukça fazla farklılık gösterebilir (Rao vd., 2016). Elektronik atık gruplarının bileşimi ve ağırlıkları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Dört ayrı AEEE grubunun bileşimi (%)

Malzeme	Büyük Ev Aletleri	Küçük Ev Aletleri	Bilgi ve İletişim Teknolojisi ve Tüketici Elektronikleri	Lamba
Demir içeren metal	43	29	36	–
Alüminyum	14	9,3	5	14
Bakır	12	17	4	0,22
Kurşun	1,6	0,57	0,29	–
Kadmiyum	0,0014	0,0068	0,018	–
Cıva	0,000038	0,000018	0,00007	0,02
Altın	0,00000067	0,00000061	0,00024	–
Gümüş	0,0000077	0,000007	0,0012	–
Paladyum	0,0000003	0,00000024	0,00006	–
İndiyum	0	0	0,0005	0,0005
Bromlu Plastikler	0,29	0,75	18	3,7
Plastikler	19	37	12	0

Tablo 2.2. (Devam). Dört ayrı AEEE grubunun bileşimi (%)

Kurşunlu Cam	0	0	19	0
Cam	0,017	0,16	0,3	77
Diğer	10	6,9	5,7	5
Toplam	100	100	100	100

AEEE'ler diğer belediye atıklarından çok daha tehlikelidir. Çünkü e-atıklar yüzlerce bileşen içerir. Ölümcül kimyasallar, kurşun, kadmiyum, krom, civa, polivinil klorürler (PVC), bromlu alev geciktiriciler, berilyum, antimon ve ftalatlar gibi maddelere uzun süre maruz kalındığında sinir sistemine, böbreklere, kemiklere, üreme sistemine kanserojen ve toksik etki eder. Bu nedenle AEEE'lerin bertarafı sağlık ve çevre açısından oldukça önemlidir. AEEE'ler içerisindeki bileşenler sızıntı suyu ile yeraltı suyuna karışabilir, toprak kirliliğine neden olabilir, geri dönüşüm amacıyla kontrolsüz demontajı ve yakılması toksik gazlar oluşturabilir ve bunun sonucunda insan ve çevre sağlığına zarar verebilir. AEEE'lerde bulunan tehlikeli maddeler, buldukları yerler ve çevre ve insan sağlığına etkileri Tablo 2.3'de gösterilmiştir.

Tablo 2.3. AEEE'lerdeki tehlikeli maddeler, buldukları yerler ve çevre ve insan sağlığına etkileri (Raovd., 2016).

Madde	AEEE'de bulunduğu yer	Çevre ve insan sağlığına etkisi
PCB (Poliklorlu bifeniller)	Kondansatörler, transformatörler	Kanser, endokrin sistem, sinir sistemi ve üreme sistemi hasarları
TBBA (tetrabromoisphenol-A)	Alev geciktirici bileşenler kablolarda ve özellikle yazılım kartlarında oldukça fazla kullanılır.	Yanması durumunda uzun süre maruz kalırsa zehirli etkiye neden olabilir.
Polibromlanmış bifeniller (PBB)		
Polibromlanmış difenil eterler (PBDE)		
CFC (kloroflorokarbon)	Soğutma ünitelerinde ve yalıtım köpüklerinde kullanılır.	Yanması durumunda halojenlenmiş maddeler toksik etkiye neden olabilir.
Polivinil klorür (PVC)	Kablo izolasyonu	Kabloların yüksek sıcaklıkta işlenmesiyle klorlar dioksin ve furanlara dönüşebilir.
Arsenik	Işık yayan diyotlar içerisinde küçük miktarlarda galyum formunda bulunur.	Akut olarak zehirli, uzun sürede sağlığa olumsuz etkileri vardır.
Baryum	CRT içerisinde bulunur.	Patlayıcı gazlar meydana gelebilir.
Berilyum	Silikon içeren güç kaynağı kutuları, ışık demeti bileşenleri	Solunursa zararlıdır.

Tablo 2.3 (Devam) AEEE'lerdeki tehlikeli maddeler, buldukları yerler ve çevre ve insan sağlığına etkileri (Raovd., 2016)

Kadmiyum	Şarj edilebilir Ni-Cd piller, Flüoresan katman- CRT ekranlar, yazıcı mürekkepleri ve tonerler	Akut olarak zehirli, uzun sürede sağlığa olumsuz etkileri vardır.
Krom-VI	Veri bantları, disketler	Akut olarak zehirli, uzun sürede sağlığa olumsuz etkileri vardır, alerjik reaksiyonlara neden olabilir.
Galyum arsenit	Işık yayan diyot (LED)	Sağlığa zararlıdır.
Lityum	Lityum bataryalar	Patlayıcı gazlar meydana gelebilir.
Civa	LCD lerin arka plan aydınlatmaları içerisindeki floüresan lambalarda, bazı alkali pillerde ve anahtarlarda bulunur.	Akut olarak zehirli, uzun sürede sağlığa olumsuz etkileri vardır.
Nikel	Şarj edilebilir Ni-Cd piller, CRT ekranlar	Alerjik reaksiyonlara neden olabilir.
Nadir elementler (itriyum, öropyum)	Floüresan tabakası (CRT ekran)	Cildi ve gözleri tahriş eder.
Çinko sülfid	Nadir elementlerle beraber CRT ekranda kullanılır.	Solunduğunda zehirlidir.
Toksik organik maddeler	Kondanserler, LCDler	
Toner tozu	Lazer yazıcılar, fotokopi makineleri için toner kartuşları	Solunduğunda zararlıdır.

AEEE'lerde bulunan ve Tablo 2.3'de verilen bazı tehlikeli maddelerin çevre ve sağlık etkileri aşağıda detaylandırılmıştır.

Arsenik: Toz ve çözünebilir maddelerde bulunan zehirli metalik bir elementtir. Kronik olarak maruz kalınması durumunda cildin çeşitli hastalıklarına yol açabilir ve sinir iletim hızını düşürebilir. Akciğer kanserine neden olabilir ve genellikle ölümcül olabilir.

Baryum: Floresan lambalarda ve vakum tüplerinde kullanılan metalik bir elementtir. Saf halde oldukça kararsız iken hava ile temas ettiğinde zehirli oksitler oluşturur. Kısa süreli baryum maruziyeti, beyinde şişme, kas güçsüzlüğü ve kalp, karaciğer ve dalak hasarına yol açabilir. Yapılan çalışmalar kan basıncını artırdığını ve kalbin çalışmasına etki ettiğini göstermektedir. Kronik olarak baryuma maruz kalınmasının uzun vadeli etkileri veri eksikliği nedeniyle henüz bilinmemektedir.

Berilyum: Akciğer kanserine neden olabileceği için kanserojen bir madde olarak sınıflandırılmıştır. Toz, duman veya sisin teneffüs edilmesiyle maruz kalınır. Az miktarda olsa dahi berilyuma sürekli maruz kalan ve ona duyarlı hale gelen kişilerde kronik

berilyum hastalığı olarak bilinen akciğer hastalığı görülebilir. Berilyuma maruz kalındığında cilt hastalıkları meydana gelebilir ve wartlike kabarcıkları oluşabilir. Çalışmalar insanların berilyuma maruz kaldıktan sonraki uzun yıllar sonunda da etkinin devam edebileceğini göstermiştir.

Bromlanmış alev geciktiriciler: Elektrikli elektronik ürünlerde polibromlu bifeniller (PBB), polibromlu difenil eter (PBDE), tetrabromobisfenol-A (TBBPA) olmak üzere üç temel BFR kullanılmaktadır; Alev geciktiriciler özellikle plastik ve tekstil ürünleri alev karşı daha dayanıklı hale getirirler. Plastiklerden taşınma ve buharlaştırma yoluyla geçerek havada ve toz halinde bulunurlar. Temel materyaller ve yazılı devre kartlarındaki halojenlenmiş bileşikler düşük sıcaklıkta dioksin içeren toksik emisyonları artırır ve bu da hormonal bozukluklara neden olur. Toksikiteden dolayı BFR kullanımı sınırlandırılmaya başlanmıştır.

Kadmiyum: Kadmiyum bileşikleri böbrekler üzerinde ciddi etkilere sahiptir. Kadmiyum solunum yoluyla ve yiyecekler ile adsorbe edilebilir. Yarılanma ömrü uzun olduğu için zehirlenme semptomları görülebilir. Çevreye akut ve kronik olarak toksik etki edebilir. Akut olarak maruz kalındığında grip gibi kas ağrısı, baş ağrısı, halsizlik, ateşlenme, üşüme, terleme semptomları görülür. Akciğer ampiyemi ve kemik hastalıklarına neden olabilir.

Kloroflorokarbonlar: Kloroflorokarbon bileşikleri (CFCs) karbon, flor, klor ve bazen hidrojen bulunmasıyla oluşur. Genellikle soğutma ünitelerinde ve yalıtım köpüklerinde kullanılır. Atmosfere salındığında stratosfer ve ozon tabakasına zarar verir. Bunun sonucunda insanlarda cilt kanserine ve bazı organlarda genetik hasarlara yol açar.

Krom: Krom ve oksitleri antikorozif özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılır. Bazı krom bileşikleri toksik değilken, krom 6 bileşikleri insan vücuduna kolaylıkla adsorbe olabilir ve hücreler içerisinde çeşitli toksik etkilere neden olabilir. Çoğu krom 6 bileşikleri göz, cilt ve mukoza zarını tahriş eder. Krom 6 bileşiklerine kronik olarak maruz kalındığında doğru bir şekilde iyileştirme yapılmazsa gözlerde kalıcı hasara neden olabilir. Krom 6, DNA hasarlarına da neden olabilir.

Dioksinler: Dioksin ve furanların çok çeşitli bileşikleri mevcut olup, dioksinler için 75, furanlar için 135 farklı bileşik olduğu bilinmektedir. Dioksin terimi aslında poliklorlanmış dibenzo-p-dioksinler (PCDDs) ve poliklorlanmış dibenzofuranlar (PCDFs)'dir. Dioksinler, bazı pestisit gibi maddelerin üretiminde yanma sırasında oluşan istenmeyen yan ürünlerdir. Dioksinler, insanlar ve hayvanlar için oldukça toksiktir. İnsan

vücudunda birikerek fetüslerde oluşum bozukluğuna, üreme ve büyüme oranının azalmasına ve bağışıklık sisteminde hasarlara neden olur. En iyi bilinen ve en toksik olan dioksin 2,3,7,8 tetrakloridbezo-p-dioksinlerdir (TCDD).

Kurşun: Demir, alüminyum, bakır ve çinkodan sonra en çok kullanılan metaldir. Elektronik endüstrisinde en çok kaplama, kurşun-asit bataryaları, elektronik bileşenler, kablo kaplama ve katot ışın tüpü (cathode ray tube-CRT) camlarında kullanılır. Kısa sürede yüksek miktarda kurşuna maruz kalınması kusma, diyare, konvülsiv-gülme krizi, koma ya da ölüme neden olabilir. Diğer semptomlar iştah kaybı, karın ağrısı, konstipasyon-kabızlık, yorgunluk, uykusuzluk, huzursuzluk ve baş ağrısıdır. Devam eden aşırı bir maruziyette böbreklere etki edebilir. Çocuklar için de kısmi olarak tehlikeli olabilir çünkü sinirsel bağlantılara zarar verir ve kan ve beyin hasarlarına neden olabilir.

Cıva: Oldukça toksik bir element olup elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sindirilirse veya teneffüs edilirse beyin hasarlarına neden olabilir. Elektrikli elektronik ürünlerin bataryalarında, bazı anahtar ve termostatlarda ve floresan lambalarda yüksek konsantrasyonda kullanılır.

Poliklorlanmış bifeniller: PCB'ler, organik bileşiklerin bir sınıfı olup dielektrik sıvısı içeren kapasitör ve transformatörlerde, ısı transfer sıvılarında, yapışkanlarda ve plastiklerde kullanılır. Hayvanlar üzerinde yapılan çalışmalar PCB'nin kansere neden olabileceğini göstermiştir. Bağışıklık sistemi, üreme sistemi, sinir sistemi, endokrin sistem üzerinde sağlık sorunlarına neden olabilir. PCB'ler çevre üzerinde kalıcı bileşiklerdir. Yağlarda çözünübilirliği yüksek olduğundan ve metabolizmalarının yavaş olması nedeniyle hemen hemen tüm organizmaların yağ açısından zengin dokularında birikir. PCB'lerin kullanılması Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) ülkelerinde yasaklanmıştır ancak geçmişte kullanıldığı için AEEE içerisinde görülmeye devam etmektedir.

Polivinil klorürler: PVC yaygın kullanılan bir plastiktir. PVC'ler %56 klor içeriğinden dolayı tehlikelidir ve alevlendiğinde hidrojen klorür gazı açığa çıkar, hidroklorik asit olarak suya geçer. Solunduğunda solunumla ilgili problemlere neden olabilir.

Selenyum: Selenyum bileşiklerine yüksek konsantrasyonda maruz kalınması kronik selenyum zehirlenmesine neden olur. En önemli belirtileri saç dökülmesi, tırnak kırılması, nörolojik anormalliklerdir (uyuşukluk, vb.).

2.3. Türkiye’de AEEE’ler ve Ulusal Mevzuat

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’ndan alınan verilere göre 2014 yılında Türkiye’de 503.000 ton AEEE oluşmuştur (The Global E-Waste Monitor, 2014). Bu AEEE miktarında televizyonlar en büyük paya sahip olan atıklardır.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı uygulamada benzerlik gösteren ve birbirini tamamlayan yönetmeliklerin birleştirilmesi politikası çerçevesinde, 2002/95/EC sayılı RoHS Direktifi ile 2002/96/EC sayılı WEEE Direktifi’nin tek bir yönetmelik olarak yayımlanması kararı kapsamında 22/05/2012 tarihinde 28300 sayılı Resmi Gazete’de “Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği” ni yayımlamıştır.

Elektrikli ve elektronik eşyaların üretiminden nihai bertarafına kadar çevre ve insan sağlığının korunması, elektrikli ve elektronik atıkların oluşumunun ve bertaraf edilecek atık miktarının azaltılması için yeniden kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım yöntemleri ve hedefleri ile ithalat, ihracat ve transit geçişlere ilişkin hukuki ve teknik esasları düzenlemek amacıyla yayımlanan yönetmelik kapsamında AEEE yönetim planı hazırlama, teminat verme ve koordinasyon merkezinin oluşturulması yükümlülüklerin 22/05/2013 tarihinde başlaması planlanmıştır.

Atık Elektrikli Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği’ne göre ülkemizde e-atıkların toplanması, ayrıştırılması ve geri kazanımı için 2013 yılından itibaren belediyelere atık toplama ve bertaraf ettirme zorunluluğu getirilmiştir. Böylece AEEE İşleme konulu Çevre İzin ve Lisans belgesine sahip tesis sayısı giderek artmaktadır. AEEE’lerin üretici sorumluluğu kapsamında yönetiminin sağlanması için üreticiler tarafından oluşturulacak yetkilendirilmiş kuruluşlar ve koordinasyon merkezinin oluşturulması hedeflenmiştir. Bu yetkilendirilmiş kuruluşlar Türkiye Bilişim Sanayicileri Derneği (TÜBİSAD), Elektrik ve Elektronik Geri Dönüşüm ve Atık Yönetimi Derneği İktisadi İşletmesi (ELDAY), Aydınlatma Gereçleri İmalatçıları Derneği (AGİD)’dir. Sosyal sorumluk projeleri kapsamında hizmet veren derneklerden bazıları ise Elektronik Atıkların Geri Dönüşümünü Destekleme Derneği (EAGD)’dir. AEEE Yönetmeliği’ne göre ülkemizdeki e-atık toplama hedefleri Tablo 2.4’de gösterilmiştir. Türkiye İstatistik Kurumu’ndan (TÜİK) alınan verilere göre 2016 yılı sonunda belirlenen nüfus 79.814.871 kişidir (TÜİK, 2017). Buna göre 2018 arasında toplanması hedeflenen AEEE miktarı ortalama 319.260 ton/yıldır.

Tablo 2.4. AEEE toplama hedefleri

	Yıllara Göre Toplama Hedefi (kg/kişi-yıl)				
	2013	2014	2015	2016	2018
1. Buzdolabı/Soğutucular/İklimlendirme cihazları	0,05	0,09	0,17	0,34	0,68
2. Büyük beyaz eşyalar (Buzdolabı/soğutucular/iklimlendirme cihazları hariç)	0,1	0,15	0,32	0,64	1,3
3. Televizyon ve monitörler	0,06	0,10	0,22	0,44	0,86
4. Bilişim ve telekomünikasyon ve tüketici ekipmanları (Televizyon ve monitörler hariç)	0,05	0,08	0,16	0,32	0,64
5. Aydınlatma ekipmanları	0,01	0,02	0,02	0,04	0,08
6. Küçük ev aletleri, elektrikli ve elektronik aletler, oyuncaklar, spor ve eğlence ekipmanları izleme ve kontrol aletleri	0,03	0,06	0,11	0,22	0,44
Toplam Evsel AEEE (kg/kişi-yıl)	0,3	0,5	1	2	4

2.4. Dünya’da AEEE’ler ve Uluslararası Mevzuat

Birleşmiş Milletler Çevre Yönetim Grubu (United Nations Environment Management Group, EMG) verilerine göre 2014 yılında 41,8 milyon ton AEEE oluşmuş olup 2018 yılında bu miktarın 50 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir. Ülkelerin gelişmişlik oranıyla birlikte kişi başına düşen e-atık miktarı da artış göstermektedir. Bazı ülkeler için kişi başı oluşan e-atık miktarı Tablo 2.5’de gösterilmiştir (Tansel, 2016).

Tablo 2.5. Bazı ülkeler için kişi başı oluşan AEEE miktarı

Ülkeler	AEEE kg/kişi 2014	AEEE milyon ton 2012	AEEE milyon ton 2014
Amerika Birleşik Devletleri	22,1	7,1	7,07
Çin	4,4	6,0	6,03
Japonya	17,3	2,2	2,20
Almanya	21,6	1,8	1,95
Rusya	8,7	1,2	1,23
Brezilya	7,0	1,4	1,41
Birleşik Krallık	23,5	1,5	1,51
Fransa	22,1	1,4	1,42
Avustralya	20,0	0,6	0,47
Güney Afrika	6,6	0,3	0,35
Tüm dünya	5,4	37,3	41,8

RoHS, 27 Ocak 2003 tarihinde Avrupa Konseyi tarafından kabul edilen 2002-95-EC numaralı zararlı maddelerin elektronik ürünlerde belirli zararlı elementlerin kullanımını kısıtlayan yönergedir. Elektrikli ve elektronik ekipmanların bazı tehlikeli madde içeriklerinin azaltılmasına yönelik olarak yayımlanmıştır. RoHS Direktifine göre

elektrikli ve elektronik ekipman atıkları ayrı toplanmış olsalar dahi içerdikleri tehlikeli maddelerden dolayı risk taşımaktadırlar. Söz konusu maddeler ise ağır metaller, PBB (çok bromlu bifenil) ve PBDE (çok bromlu difenil eteril) olarak sıralanmaktadır.

Avrupa Birliği'nde elektrikli ve elektronik ekipman atıkları ile ilgili 2002/96/EC sayılı WEEE Direktifi 13/02/2003 tarihinde yürürlüğe girmiş ve 4 Temmuz 2012 tarihinde revize edilmiştir. Revize WEEE Direktifi kapsamında 2016 yılı itibariyle, 3 yıldır satışta bulunan her 100 tonluk cihaz satışı için, 45 tonluk AEEE toplanması, 2019 yılı itibariyle bu oranın %65'e çıkarılması amaçlanmaktadır. Diğer bir deyişle alternatif olarak ortaya çıkan e-atığın %85'inin toplanması hedeflenmiştir.

Revize direktifte öne çıkan önemli değişikliklerden biri de: Üye ülkelerde faaliyet gösteren üreticiler, diğer üye ülkelere elektrikli ve elektronik ekipman sattıklarında; alıcı üye ülkede gerçekleştirdikleri faaliyetlerin sonucundan sorumlu tutacakları yetkili temsilciyi de atamak zorundadır. WEEE Direktifi, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının ayrı toplanmasını ve geri kazanımını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, üreticilerin ürünlerinin ömrünü tamamlama aşamasından da sorumlu tutulmaları esasından hareketle, söz konusu üreticilerden ürünlerini geri kazanım, geri dönüşüm ve parçalanabilirlik olanaklarını değerlendirerek tasarımları beklenmektedir. WEEE Direktifi ile amaçlanan doğal kaynakları akıllıca kullanarak, geri dönüşüm ve tekrar kullanımla ilgili atık yönetimi stratejilerini benimseyerek çevreyi ve insan sağlığını korumaktır.

2.5. Elektrikli Elektronik Atıkların Geri Dönüşüm Yöntemleri

E-atıklar fiziksel, kimyasal ve ısıl yöntemlerle geri kazanılmaktadır. AEEE'lerin toplanması, ayrıştırılması, geri dönüştürülmesi ve bertaraf süreçlerinin kuruluşlar için maliyetleri vardır. Atıkların toplanması sürecinde bir lojistik ağı kurulması, akaryakıt, araç bakım giderleri, taşıyıcı giderleri, ayrıştırma ekipmanlarının bakım giderleri, işçilik giderleri, geri kazanım boyunca tüketilen kaynak miktarı ve bertaraf giderleri vardır. Bununla birlikte AEEE geri dönüşüm işleminin temel amacının kaynak tüketimini azaltmak olmasının yanı sıra ekonomik olarak da fayda sağlanmaktadır. AEEE'lerden geri kazanılan metallerin satışı için borsa takibi yapılmaktadır. Ülkemizde demir metali borsası genellikle Çolakoğlu Metalurji A.Ş., Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş., Ereğli Demir Çelik Fabrikası T.A.Ş.'leri tarafından belirlenmektedir. Bakır, alüminyum gibi kıymetli metallerin borsası çoğunlukla Londra Metal Borsası (Londra

Metal Exchange-LME)’ndan takip edilmektedir. Metal borsasını belirleyen diğer kuruluşlardan bazıları da Chicago Ticaret Borsası (Chicago Mercantile Exchange-CME Grup) ve Şangay Vadeli İşlem Borsası (Shanghai Futures Exchange-SHFE)’dir.

2.5.1. Endüstriyel geri dönüşüm yöntemleri

Endüstriyel geri dönüşüm yöntemleri pirometalurjik, hidrometalurjik, mekanik-fiziksel geri dönüşüm yöntemleri olarak sınıflandırılmaktadır.

2.5.1.1. Pirometalurjik yöntem

Pirometalurjik geri dönüşüm yöntemi havasız bir ortamda ya da inert bir atmosferin varlığında atık BDK’ların ayrıştırılmasıyla gerçekleşir. Bu yöntem BDK geri dönüşümü için önemli ve gelişmiş bir teknolojidir ve birçok yerde kullanılmaktadır. Pirometalurji insinerasyonla benzerlik göstermesine rağmen farklı ve ayrı tekniklerdir. Pirometalurji ve insinerasyon arasındaki temel fark; insinerasyonda amaç uygun ısı artışıyla BDK’ların BDK hacminin azaltılmasıken pirometalurjik yöntemde ise amacın kaynak geri dönüşümünün sağlanması, besleme materyalindeki BDK’larının metal ve metal olmayan fraksiyonlarının ayrılması ve organik ve diğer bileşenlerinin likit ve gaz forma dönüştürülmesidir. Pirometalurjik yöntem için ortamdaki oksijenin uzaklaştırılması gerektiğinden maliyeti insinerasyondan daha fazladır.

Pirometalurjik proseste iki aşama vardır. Birinci aşamada uçucu organik bileşiklerin uzaklaştırılmasıyla ve ısı artışıyla atık BDK’lar ayrıştırılır. İkinci aşamada yapı içerisindeki polimer pirolizle karbonlaşır. Bu yüzden sıcaklık pirometalurji de çok kritik bir değişkendir. Düşük sıcaklık (<400⁰C) sıvı ürün için tercih edilirken yüksek sıcaklık (>800⁰C) bileşiklerden yüksek ağırlıklı moleküllerin kırılmasını kolaylaştırır böylece daha küçük organik moleküller üretilir.

BDK’ların pirolizi, inert atmosferin eksikliğinde 800⁰C’den daha düşük sıcaklıkta polibromlanmış dibenzodioxin (PBDD) formuna neden olacağından oldukça tehlikelidir. Normalde, özellikle büyük ölçekli uygulamalarda oksijensiz hava sağlamak zordur bu yüzden düşük sıcaklıkta piroliz, PBDD oluşturmaya sebebiyle oldukça ciddi bir sorundur.

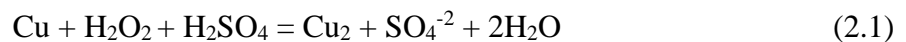
Pirometalurji ürünleri birkaç grupta karakterize edilebilir; piroliz reaksiyonlarına bağlı olarak üretilen piroliz yağı veya piroliz gazı kimyasal materyal kaynağı olabilir veya yakıt olarak kullanılabilir ancak karmaşık ve belirsiz bir ürün olması uygulamada

kullanılmasını zorlaştırmaktadır. HBr, bromlanmış fenollerin yan ürünleri, PCDD, PBDD piroliz ürünleri içerisinde bulunabilir ve sucul toksisiteye, karsinojeniteye ve mutajeniteye sebep olabilir. Pirolizden sonra kalan inorganik bileşenlerin çok miktarda asidik atık üretmesi, su ortamını tehlikeye atar ve insan sağlığında yan etkilere neden olur.

Pirometalurjik geri dönüşüm teknikleri, metal olmayan bileşenlerin kaybına neden olsa da metalik fraksiyonlarının büyük miktarının geri dönüştürülmesini sağlar. Metalik olmayan parçaların yakılması bromorganik bileşikler ve zehirli emisyonlar üretir, %20-25 oranında kül oluşturur bu da ağır metal içerir ve bertarafı ve rafinerisinde daha fazla iş yükü gerekir. Pirometalurji ürünlerinin daha fazla rafine ile saflığının artırılması gerekebilir. Pirometalurjik yöntemle AEEE'leri geri dönüştüren şirketlerden bazıları Boliden (İsveç), Xstrata Copper (Kanada), Aurubis (Almanya) ve Umicore (Belçika)'dır (Ning, Lin, Hui, & McKay, 2017).

2.5.1.2. Hidrometalurjik yöntem

Hidrometalurjik proses, pirometalurjik proses ile karşılaştırıldığında düşük maliyet, daha az çevresel etki ve kolay yönetilebilir olması nedeniyle son yıllarda e-atıkların geri dönüşümünde çoğunlukla tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Hidrometalurjik proses genel olarak liç, saflaştırma ve geri dönüşüm aşamalarından oluşur. BDK'ler içerisinde bakır, kurşun, çinko ve kadmiyum gibi kıymetli metaller bulunur. Genellikle liç işlemi, hidrometalurjik prosesin ilk adımıdır. Uygun bir yıkama solüsyonu ile e-atık bileşenleri çözülür ve yüklü bir solüsyon elde edilir. Temel metallerin özellikle bakırın liç edilmesinde H₂SO₄, HNO₃, kral suyu ve HClO, H₂O₂, O₂, Fe⁺³, Cl₂ içeren çeşitli oksidantlar kullanılır. Hidrometalurjik yöntem ile geri dönüştürülen bakır, birincil madde olan bakır cevherinin tüketilmemesi için ikincil kaynak olarak kullanılmaktadır. Tipik olarak, saf bakır yüklü bir solüsyon üretmek için bakır sülfürik asit içerisinde çözülür ve yüklü solüsyon, bakırın saflığını artırmak için çözücü ekstraksiyonuna geçer. Sonunda, saf bakır daha fazla elektro kazanım uygulanmasıyla elde edilir. H₂O₂ ile bir asit liçi eşitlik 2.1'de gösterilmiştir (Cui, 2016).



Hidrometalurjik yöntemin pirometalurjik yöntemle göre avantajları şunlardır (Iannicelli-Zubiani, 2017);

- Toksik ve kirlenici emisyon riski azalır. Halojenli alev geciktirici (Halogenated Flame Retardant- HFR)'nin sebep oluğu dioksin ve furanlar kısmi olarak oluşur.
- Saflaştırma adımında metal geri kazanımı etkilidir.
- Düşük enerji gerekir, organik yakıt gerekli değildir.
- Çevre ve insan sağlığına yönelik risk oluşturmaz.

Dezavantajları ise;

- Çok fazla proseten oluşur.
- Çok fazla kimyasal madde tüketilir.
- Atıksu oluşumu çoktur, olarak sıralanmaktadır

2.5.2. Laboratuvar ortamında geri dönüşüm yöntemleri

BDK'ların henüz endüstrileşme aşamasına geçmemiş laboratuvar ölçeğinde geri dönüşüm yöntemlerini biyometalürjik yöntem, piroliz, süperkritik akışkan ve mekanik-fiziksel yöntem kullanım yöntemleri oluşturmaktadır.

2.5.2.1. Biyometalürjik yöntem

Biyometalürjik prosete metallerin çözünürlüğü metaller ile biyosorbentler veya mikroorganizmalar arasındaki etkileşime bağlıdır. Bu teknik, doğal biokimyasal döngülerdekine benzer bir metal geri kazanım prosesidir, bu nedenle çevre dostudur. Düşük maliyetlidir ve az enerji gerektirir. Metallerin geri kazanımı için biometalürjinin iki geniş temel alanı vardır; biyoliç ve biyosorpsiyon. Dört ana biyosorpsiyon tekniğı vardır.

Besin maddelerinin ilavesi ile yerli mikroorganizmaların aktivitesinin uyarılması, redoks koşullarının düzenlenmesi, pH koşullarının optimize edilmesi, vb.

Alanın belirli biyotransformasyon yetenekleri olan mikroorganizmalar tarafından aşılması.

Sabit enzimlerin uygulanması

Kirleniciyi uzaklaştırmak ve / veya değiştirmek için pirinç, yonca, çimen gibi diğer bitkilerin kullanılması (pirötemediasyon)

2.5.2.2. Vakum pirolizi

Vakum pirolizi, düşük basınç ve sıcaklık uygulanması avantajı nedeniyle çok sayıda araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Bu koşullar altında, organikler gazlar ve sıvılar olarak damıtılır ancak ayrışmaya devam etmezler. Yoğunlaştırılabilme ve yakıt olarak kullanılabilme özelliklerinden dolayı vakum pirolizi için gerekli ısı enerjisi veya kimyasal ham madde olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, katı atık madde cam elyafı ve kalan metalleri içermekte ve daha ileri işlem gerektirmektedir. Ayrıca, piroliz işlemlerinin hidrojen bromür, organobromlanmış bileşikler ve bromlu alev geciktiricileri imha ettiğine dair güçlü kanıtlar vardır. Zhou tarafından iki tip atık baskılı devre levhasının piroliz ürünleri gösterilmiştir. Her iki durumda da, % 20-30 yağ ve %4-6 yakıt olarak kullanılabilen gaz elde edilmiştir. Piroliz kalıntısında çeşitli metaller, cam elyafları ve daha ileri bir proses ile geri dönüştürülebilen ve kullanılabilen diğer inorganik materyaller görülmüştür. Louret tarafından yakıt analizi yapılmış ve elde edilen yağın ağırlıklı olarak fenolik ve furanik bileşiklerden oluştuğunu ve gazın karbon monoksit, karbondioksit, metil bromid, hidrojen bromür ve çeşitli alkanlar ve alkenlerden oluştuğu görülmüştür. Yangetal, atık baskılı devre levhalarının piroliz ürünü olan yağın ağır fraksiyonunun asfalt düzenlemesinde kullanılmasını önermiştir. Yağın asfalt içerisine dahil edilmesiyle asfaltın fiziksel ve suya karşı dirençli olma özelliğinin artırılacağı gösterilmiştir (Hadi P. X., 2015).

2.5.2.3. Savurmalı ayırma ve vakum pirolizi

Yeni geliştirilen iki aşamalı ayırma prosesi savurmalı ayırma ve vakum pirolizi ile ayrıştırmayı amaçlamıştır. İlk aşamada atık BDK, döner tambur içerisindeki dizel yağına daldırılarak 240⁰C'ye kadar ısıtılır. Yoğuşmasız piroliz gazı ayrıştırılır, toplanır ve yalnızca bu sıcaklıkta eriyen lehim, döner tamburun savurma gücüyle ayrılır ve lehimsiz bir kalıntı kalır. İkinci aşamada kalıntı piroliz reaktörüne yerleştirilir ve 1,5 kPa'dan daha düşük bir vakum basıncı uygulanır. İlk aşamada piroliz gazı kullanılarak reaktör 600⁰C'ye kadar ısıtılır ve fırın bu sıcaklıkta belirli bir süre tutulur. Sıvılar ve gazlar yoğunlaştırılır ve toplanır. Vakum pirolizi ve savurmalı ayırmanın rolü, taban levhasından ayrılan lehimin piroliz kalıntılarında geriye kalanlar ile karşılaştırıldığında lehimin düşük erime sıcaklığı kullanılarak ayrılmasıdır. Zhou tarafından sıcaklık ve dönme hızının lehim uzaklaştırmayı etkileyen iki önemli faktör olduğu gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar ile

neredeşye tüm lehimlerin döner tambur 1200 rpm de 10 dk çalışırsa piroliz kalıntısından 400⁰C’de ayrılacağı gösterilmiştir (Hadi P. X., 2015).

2.5.2.4. Vakum pirolizi ve mekanik proses

Long tarafından vakum pirolizinin mekanik prosesler ile uygulanması durumunda farklı materyallerinde elde edilebileceği gösterilmiştir. Atık BDK materyallerinin parçalanmasıyla dört aşamalı ayırma prosesi başlar. Vakum pirolizi ürünü olarak yağ ve gaz ayrılır. Katı kalıntılar parçalanır ve boyutlara göre sınıflandırma yapılır. Piroliz kalıntısı, metal olmayan bileşenlerin hafif fraksiyonları ve bakırın ağır fraksiyonu düşey bir zig-zag hava akışlı seperatör kullanılarak yer çekimi ile ayrılır. Bu metod yüksek kalitedeki metalleri ve metal olmayanları ayırmada etkilidir (Hadi P. X., 2015).

2.5.2.5. Süperkritik akışkan

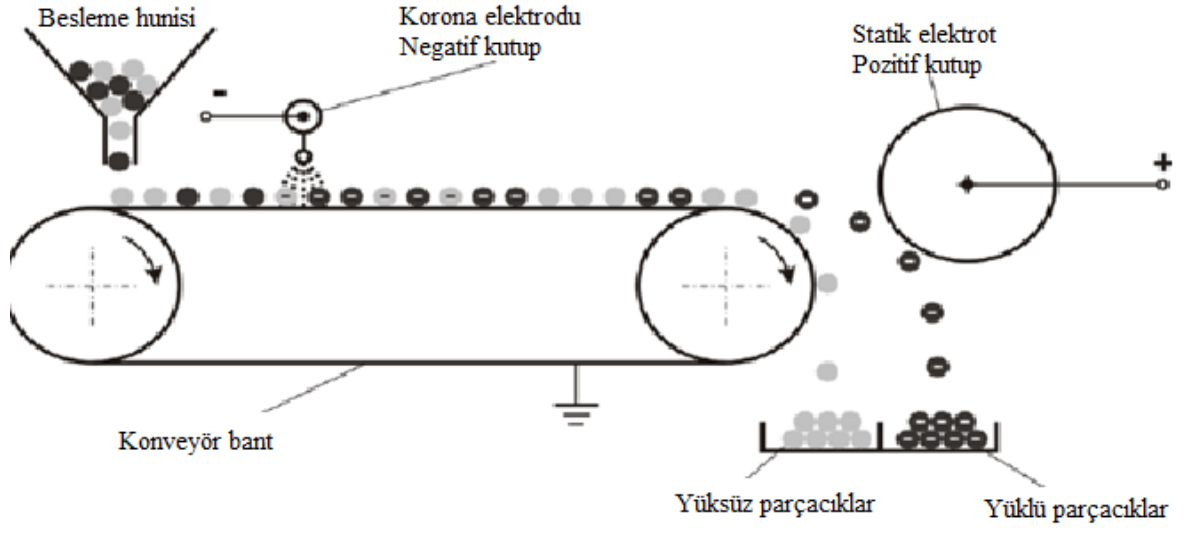
Metal ve metal olmayan fraksiyonları daha etkili bir şekilde ayırmak için süperkritik akışkan yeni geliştirilen bir yöntemdir. Süperkritik su, süperkritik koşullarda organik türlerin, oksijenin ve suyun homojen faza gelmesini sağlayan hidrojen bağlama özelliğini gösterir, bu da kütle taşıma sınırı olmadan daha verimli bir oksidasyon gerçekleşmesini sağlar. Chien tarafından atık baskılı devre kartlarının oksidasyonunun sodyumhidroksit varlığında son derece gelişmiş olduğunu belirtilmiştir. Burada bromun büyük bir kısmı sıvı fazda kalırken katı maddede bakır, bakır oksit ve bakır hidroksit olarak kalır. Xing ve Zhang tarafından bromlu epoksi reçineleri, sıcaklık, su içeriği ve bekletme süresi kontrol edilerek zenginleştirilmiş HBr’e tamamen ayrışması sağlanmıştır. kelti ve süperkritik su arıtma yöntemlerinin sırasıyla cam elyaflarının ve bakırın etkili bir şekilde ayrılmasını sağladığı gösterilmiştir. Xiuetal tarafından süperkritik bozunma elektro kinetik prosesle birleştirilmiş ve optimum süper kritik ve elektro kinetik şartlar altında bakır ve kurşun geri kazanılmıştır. Geri kazanılmış metal iyonlarının hem geri kazanım oranının hem de saflığının yeterince yüksek olduğu gösterilmiştir. Bu proseste, bakır katot bölmesine hareket eder ve katotta birikir, kurşun ise anot ya da katota doğru hareket eder ve katotta az miktarda birikir. Bu bromlu bileşiklerin bozunmasını sağlamakla beraber atık BDK’lardan metallerin etkili bir şekilde ayrılmasını da sağlar. Xiuetal tarafından metallerin ayrıştırılması için asit liçi yapılarak benzer bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Süperkritik suyun yanı sıra BDK'ların geri dönüşümü için diğer süper kritik akışkanlar da kullanılmıştır. Sanyal tarafından süperkritik karbondioksit ile az bir miktarda su kullanılarak BDK bileşenlerini bakır folyo, cam elyaf ve polimer olarak ayrılmıştır. BDK pirolizinde yaygın olarak görülen zararlı hidrokarbon maddelerinin oluşmaması, süperkritik karbon dioksit geri dönüşüm sürecinin çevre dostu olduğunu gösterir. Wang tarafından atık BDK'larda süperkritik karbon dioksit kullanarak alev geciktiricilerin ekstraksiyonu araştırılmış ve proses veriminin yüksek olduğu gösterilmiştir. Xiu ve Zhang tarafından süper kritik metanol kullanılarak fenol içeren yağ ve brom içeren gaz elde edilmiştir. Düşük işlem sıcaklıkları altında yağ çok miktarda alev geciktirici içerirken, yüksek sıcaklıkta çalışıldığında alev geciktiricinin tamamen ayrıldığı görülmüştür. Ayrıca HBr tekrar tekrar kullanılmak için gazdan geri kazanılmıştır ve katı üründe daha fazla metal tutulmuştur (Hadi P. X., 2015).

2.5.2.6. Mekanik fiziksel ayırma yöntemi

Mekanik-fiziksel ayırma için birkaç yöntem vardır. Bunlar, manyetik ayırma, boyuta göre ayırma, yoğunluğa bağlı ayırma, elektriksel iletkenlik ve bunların çeşitli kombinasyonları ile ayırmadır. Bu işlemler genellikle atık BDK'ların metalik ve metalik olmayan fraksiyonları arasındaki fiziksel farklılıklara dayanır.

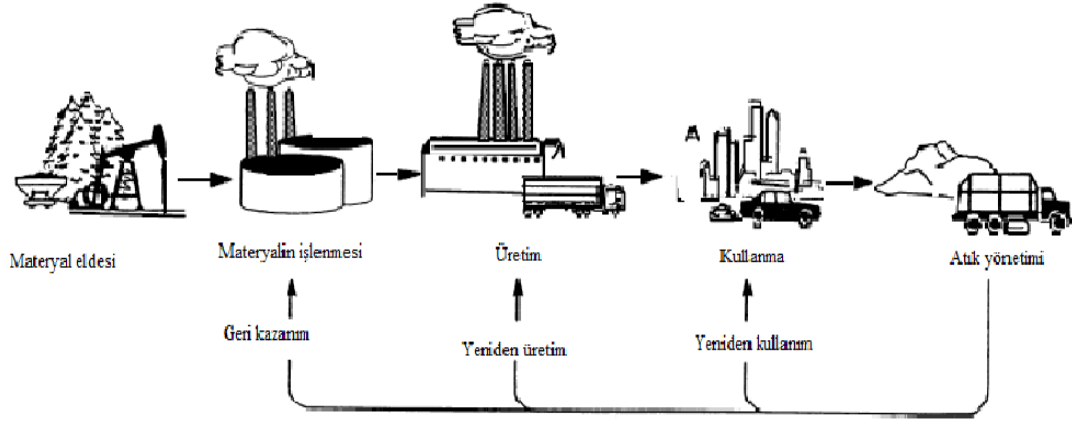
Korona-elektriksel metodu, metalik ve metalik olmayan fraksiyonları ayırmak için mevcut olan en etkili fiziksel yöntemdir. Bu metodun avantajı çevre dostu olması, atıksu ve gaz emisyonu oluşturmamasıdır. BDK'ların metalik bileşenleri çok küçük partiküller haline getirilerek ayrılmalıdır, bu sertleştirilmiş zemine yüksek hızda çarpma işlemi ile sağlanabilir. Daha sonra, 0,6 mm'den küçük olan parçacıklar, titreşimli bir besleyici ile döner silindire geçirilir, burada bir korona ve elektrostatik elektrot kullanılarak yüksek voltajlı bir elektrostatik alan oluşur. Metalik olmayan parçacıklar şarj olur ve silindire bağlı kalır sonunda depo kutularına düşer ve orada toplanır. Metalik partiküller ise topraklanmış bir elektrot yönünde hızlı bir şekilde deşarj olurlar (Hadi vd., 2015). Korona elektrostatik ayırma diyagramı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Korona elektrostatik ayırma diyagramı

3. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

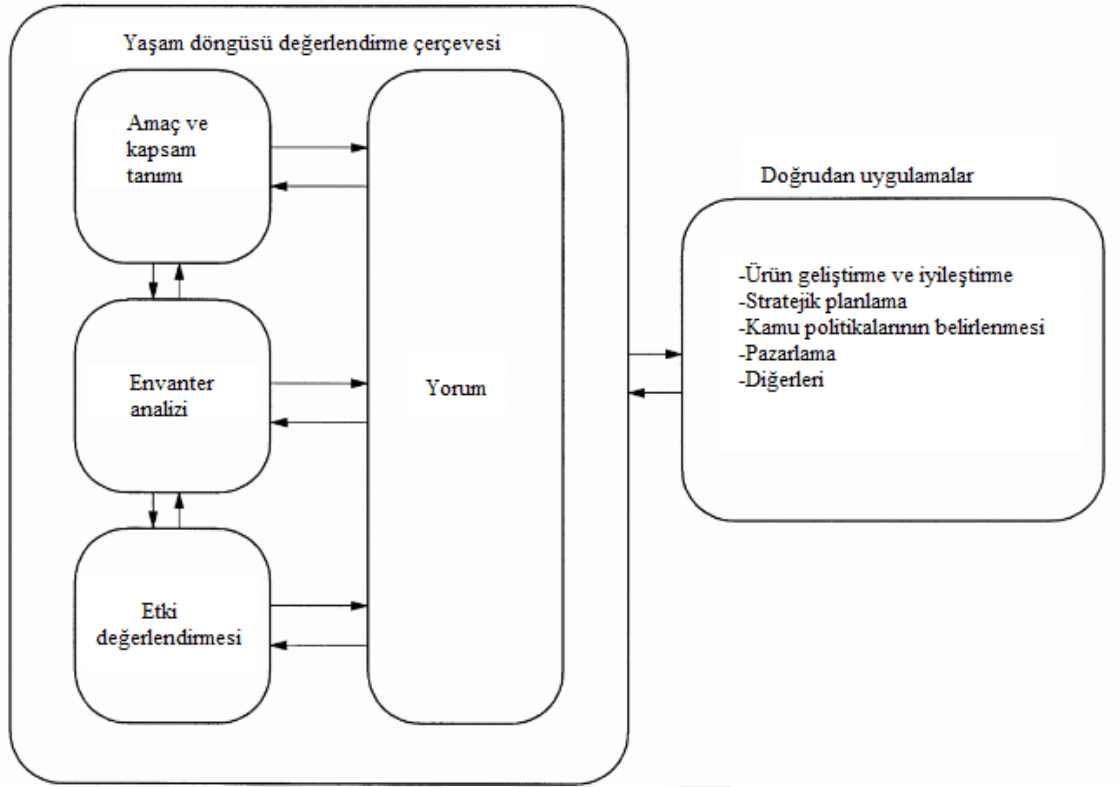
Yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment- LCA), bir ürünün, prosesin veya hizmetin çevresel etkilerini belirlemek için çevre yönetiminde kullanılan bir araçtır. Doğal yaşamda, yaşam döngüsü doğumdan ölüme kadar olan tüm süreçleri kapsamaktadır. Buradan esinlenerek LCA'da beşikten mezara yaklaşımıyla bir ürünün ham maddesinin elde edilmesinden, üretimi, kullanımı ve yaşam sonu sürecindeki etkileri değerlendirilmektedir. Ancak bazen beşikten kapıya, kapıdan kapıya ya da kapıdan mezara yaklaşımlarıyla tek bir adıma odaklanılabilir. Şematik olarak bir ürünün yaşam döngüsü Şekil 3.1'de gösterilmiştir (Matthews vd.,2014).



Şekil 3.1. Fiziksel bir ürünün yaşam döngüsü

LCA prosedürü 1990'lı yıllara kadar uygulanmamasına rağmen kökeni 1960' lı yıllara kadar uzanmaktadır. Pek çok insan tarafından LCA'nın ilk kez Coca-Cola firmasının 1969'da cam şişe kullanımı ile plastik şişe kullanımı arasında karar vermesi aşamasında kullanıldığı bilinmektedir (Matthews vd., 2014).

LCA, Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu (International Organization for Standardization-ISO) tarafından standartlaştırılmıştır. ISO 14040 ve ISO 14044'e göre LCA, üretilen ve tüketilen ürünlerin çevre üzerindeki muhtemel etkilerinin daha iyi anlaşılması ve azaltılması için yöntemlerin geliştirilmesinde kullanılan bir tekniktir. ISO 14044 yaşam döngüsü değerlendirmesinin yürütülmesi için gerekenleri vermektedir. ISO14040'dan uyarlanan yaşam döngüsü değerlendirme çerçevesi Şekil 3.2'de gösterilmiştir. (ISO 14040, 2007).



Şekil 3.2. ISO 14040'dan uyarlanmış, yaşam döngüsü değerlendirmesi genel yapısı

LCA'nın uygulamaları aşağıda sıralanmıştır:

1. Ürünlerin kullanım ömürleri boyunca çeşitli noktalardaki çevresel performanslarının iyileştirilmesi için imkanların belirlenmesinde,
2. Sanayide, kamu kuruluşlarında veya sivil toplum kuruluşlarında (stratejik planlama, öncelik belirleme, ürün ve süreç tasarımı veya yeniden tasarımı amaçları için) karar vericilerin bilgilendirilmesinde,
3. Ölçme teknikleri de dahil olmak üzere, ilgili çevresel performans göstergelerinin seçiminde,
4. Pazarlamada (çevre etiketi uygulaması, çevresel bir beyanın hazırlanması veya çevresel ürün açıklaması geliştirilmesinde) yardımcı olabilir. (ISO 14044, 2007)

LCA çalışması dört aşamadan oluşur:

Aşama 1: Amaç ve kapsam bir ürünün yaşam döngüsünün ele alınan bölümünün ne kadar büyüklükte olacağını ve hangi amaca hizmet edeceğini tanımlamayı amaçlamaktadır. Sistem karşılaştırmasını sağlayan kriterler ve zamanlar bu aşamada açıklanmaktadır.

Aşama 2: Bu aşamada envanter analizi, üretim sistemi içerisindeki materyal ve enerji akışını, çevre ile olan etkileşimini ve tüketilen ham maddelerin ve emisyonların çevreye olan etkisini açıklamaktadır.

Aşama 3: Envanter analizinin ayrıntıları etki değerlendirmesini sağlamaktadır. Bu aşamada etki kategorilerinin sonuçları açıklanmaktadır. Her etki kategorisinin önemi normalizasyonla ve buna bağlı olarak ağırlıklandırma ile değerlendirilmektedir.

Aşama 4: Yaşam döngüsünün yorumlanması tartışma, karar verme, verilerin hassaslığı ve sonuçların gösterimini kapsamaktadır. (Muralikrishna & Manickam, 2017)

Yaşam döngüsü değerlendirmesi yaparken aşağıdaki konuların dikkate alınması gerekmektedir;

Bir ürünün yaşam döngüsü değerlendirmesinin her aşamasında insan faaliyetlerinin getirdiği yükler, tüketilen kaynaklar ve enerji (girdiler) ve ortaya çıkan kirleticiler ve atıklar (çıktılar) hesaplanarak belirlenmektedir. Girdiler ve çıktılar, yenilenebilen ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının uzun vadede sürdürülebilirliği, insan sağlığı, biyoçeşitlilik ve diğerleri üzerindeki olumsuz etkilerine göre değerlendirilmektedir. Bunlar bilindikten sonra çıktıların çevre üzerindeki etkisini azaltmak için önlemler alınabilir (Muralikrishna & Manickam, 2017).

Yaşam döngüsü değerlendirmesinde ürünün elde edilmesi için gerekli olan girdilerin elde edilmesinden çıktıların bertaraf edilmesinin getirdiği yüklere kadar tüm aşamalar sistem sınırlarına dahil edilebilir. Araştırmacının tercihine göre sistem sınırları belirlenebilir. Bunun için yaşam döngüsü değerlendirmesinde aşağıdaki yaklaşımlar kullanılır:

- Beşikten mezara: Beşikten mezara yaklaşımında üretimden (beşikten) kullanım aşaması ile bertaraf aşamasına (mezara) kadar olan tüm süreçleri kapsayan bir yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmaktadır. Tüm aşamalardaki girdi ve çıktılar değerlendirmede dikkate alınmaktadır.
- Beşikten kapıya: Beşikten kapıya yaklaşımında üretimden (beşikten) üretim sonunda (kapıya) kullanıcıya ulaşmadan öncesine kadar olan aşamalar yaşam döngüsü değerlendirmesine dahil edilmektedir. Ürünün kullanım ve bertaraf aşamaları değerlendirmede ihmal edilmektedir. Beşikten kapıya yapılan değerlendirmeler Çevresel Ürün Beyanlarının temelini oluşturabilir. Ulaştırma

aşamasında fosil yakıt yerine biyoyakıt kullanılması LCA'nın nihai değerlendirmesinde etkili olabilir.

- Beşikten beşiğe: Beşikten beşiğe yaklaşımı beşikten mezara yaklaşımının özel bir çeşididir. Ürünün kullanım ömrü sonunda geri dönüşüm aşamasının değerlendirildiği yaklaşımdır. Geri dönüşüm ile aynı ürünlerin elde edilmesi, örneğin geri dönüştürülmüş kutulardan alüminyum içecek kutularının üretilmesi veya farklı ürünlerin elde edilmesi, örneğin toplanan cam şişelerden yalıtım ürünü olan cam yünü elde edilmesi sağlanmaktadır.
- Yaşam döngüsü enerji analizi: Yaşam döngüsü enerji analizi (Life Cycle Energy Analysis-LCEA), bir üretimde tüm enerji girişlerinin hesaba katıldığı yaklaşımdır. Sadece üretim aşamasındaki enerji girişini değil, üretim için gerekli bileşenleri, malzemeleri ve hizmetleri üretmek için gerekli olan tüm enerji girişlerini içermektedir. LCEA ile tüm yaşam döngüsü için toplam enerji girişi dikkate alınmaktadır. Bu nedenle enerji kaynağının ne olduğunu, yenilenebilir enerji kaynaklarından mı ya da fosil yakıtlardan mı elde edildiğini bilmek çok önemlidir.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi, kolayca anlaşılabilen ve değerlendirilebilen bir kavramdır. Uygulamasının ise genellikle veri ihtiyaçları, zaman, harcamalar ve belirsizlik nedeniyle sonuçların güvenilirliği konusunda zorlu ve en azından pratik olmadığı kanıtlanmıştır. Bu durum temel LCA kavramını korumaya çalışırken daha verimli ve anlaşılır kılan modern LCA'nın geliştirilmesine yol açmıştır. Kurallara veya diğer kabul edilebilir düzenlemelere göre birbiri ile bağlantılı spesifik çevresel etkilerin önemine uygun olarak kriterler belirlenebilir:

- Etkinin mekânsal ölçeği,
- Tehlikenin ciddiyeti, üretimdeki bir materyalin potansiyel zararı, materyalin miktarı ve buna maruz kalan nüfus,
- Maruziyet derecesi

LCA'daki çevresel endişeler Tablo 3.1'de ve hedef kaynaklar Tablo 3.2'de verilmiştir (Muralikrishna & Manickam, 2017).

Tablo 3.1. Çevresel endişeler

Kritik Çevresel Endişeler
1. Küresel iklim değişikliği
2. Biyoçeşitliliğin kaybı
3. Strotosferik ozon tabakasının incelmesi
4. İnsan organizmasının hasarı
5. Su mevcudiyeti ve kalitesi
6. Fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi
Çok Önemli Çevresel Endişeler
7. Toprak tükenmesi
8. Yetersiz arazi kullanımı
9. Asit birikimi
10. Smog
11. Estetik bozulma
12. Fosil yakıtlar dışındaki kaynakların tükenmesi
Daha Az Önemli Çevresel Endişeler
13. Petrol sızıntıları
14. Radyonüklitler
15. Koku
16. Termal kirlilik
17. Düzenli depolama tükenmesi

Tablo 3.2. Çevresel endişeler ile bağlantılı hedef faaliyetler

1. Küresel iklim değişikliği	<ul style="list-style-type: none">• Fosil yakıt yanması (CO₂ emisyonu)• Çimento üretimi (CO₂ emisyonu)• Pirinç ekimi (CH₄ emisyonu)• Kömür madenciliği (CH₄ emisyonu)• Geviş getiren hayvan popülasyonları (CH₄ emisyonu)• Atık arıtma (CH₄ emisyonu)• Biyokütle yakma (CH₄ ve CO₂ emisyonu)• CFCs, HFCs, N₂O emisyonları
2. Biyoçeşitlilik kaybı	<ul style="list-style-type: none">• Yaşam alanı kaybı• Habitatın parçalanması• Herbisit, böcek ilacı kullanımı• Tehlikeli kimyasalların yüzey sularına deşarjı• Yüzey sularında çözülmüş oksijenin azaltılması• Petrol sızıntıları• Su kaynaklarının tükenmesi• Hassas ekosistemlerde endüstriyel gelişme
3. Strotosferik ozon tabakasının incelmesi	<ul style="list-style-type: none">• CFCs emisyonları• HCFCs emisyonları• Halojen emisyonu• Azot oksit emisyonu
4. İnsan organizmasının hasarı	<ul style="list-style-type: none">• Tehlikeli maddelerin havaya emisyonu• Suya tehlikeli madde emisyonu• Tehlikeli maddelerin depolama alanlarına atılması• Su kaynaklarının tükenmesi• Fiziksel organizma hasarı
5. Su mevcudiyeti ve kalitesi	<ul style="list-style-type: none">• Tüketici yüzey suyu kullanımı• Herbisitlerin ve böcek ilaçlarının kullanımı• Tarımsal gübrelerin kullanımı• Tehlikeli maddelerin yüzey veya yer altı sularına deşarjı

Tablo 3.2. (Devam). Çevresel endişeler ile bağlantılı hedef faaliyetler

6. Kaynak tükenmesi: Fosil yakıtlar	<ul style="list-style-type: none">• Enerji için fosil yakıt kullanımı• Fosil yakıtların hammadde olarak kullanılması
7. Toprak tükenmesi	<ul style="list-style-type: none">• Toprak erozyonu• İz metallerin toprağa atılması veya biriktirilmesi• Geliştirilebilir, ekilebilir arazi kaybı
8. Yetersiz arazi kullanımı	<ul style="list-style-type: none">• Geliştirilebilir, ekilebilir arazi kaybı• Habitat imhası• Gelişmiş arazinin terk edilmesi
9. Asit birikimi	<ul style="list-style-type: none">• Fosil yakıt yanması• Kükürt oksitlerin havaya emisyonu• Azot oksitlerin havaya emisyonu
10. Smog	<ul style="list-style-type: none">• Fosil yakıt yanması• VOC'ların havaya emisyonu• Azot oksitlerin havaya emisyonu
11. Estetik bozulma	<ul style="list-style-type: none">• Havaya partikül madde emisyonu• Kükürt oksitlerin havaya emisyonu• Fosil yakıtların tam yanmaması• Biyokütle yakma• Habitat kaybı• Petrol sızıntıları• Katı atıkların atılması• Sıvı atıkların atılması
12. Fosil yakıtlar dışındaki kaynakların tükenmesi	<ul style="list-style-type: none">• Kaynağı sınırlı olan metallerin kullanımı• Habitat imhası• Biyomalzemelerin kullanımı• Katı kalıntıların atılması• Sıvı kalıntıların atılması• Gaz kalıntıların atılması
13. Petrol sızıntıları	<ul style="list-style-type: none">• Petrolün taşınması• Petrolün rafine edilmesi• Petrol ürünlerinin dağıtımı
14. Radyonüklitler	<ul style="list-style-type: none">• Nükleer enerji üretimi• Radyoizotop içeren ürünlerin imalatı
15. Koku	<ul style="list-style-type: none">• Kokulu endüstriyel emisyonlar• İşlenmemiş kokulu atıklar
16. Termal kirlilik	<ul style="list-style-type: none">• Isıtılmış suyun yüzey sularına deşarjı• Isıtılmış suyun yer altı suyuna deşarjı• Isıtılış havanın boşaltılması
17. Düzenli depolama tükenmesi	<ul style="list-style-type: none">• Katı atıkların çöp alanlarına atılması• Sıvı atıkların çöp alanlarına atılması

3.1. Amaç ve Kapsam

LCA'nın ilk adımı amaç ve kapsamın belirlenmesidir. Sonraki adımlar, çalışmanın amacı ve beklenenlerin halka açıklanmasıdır. Son olarak, çalışmanın beklenen uygulamaları için gerekenleri belirtmektir.

Çalışmanın sınırlarını doğru bir şekilde belirtebilmek için iki önemli husus gereklidir. Birincisi fonksiyonel birim olup tüm akışları ve çevresel etkileri temsil eden

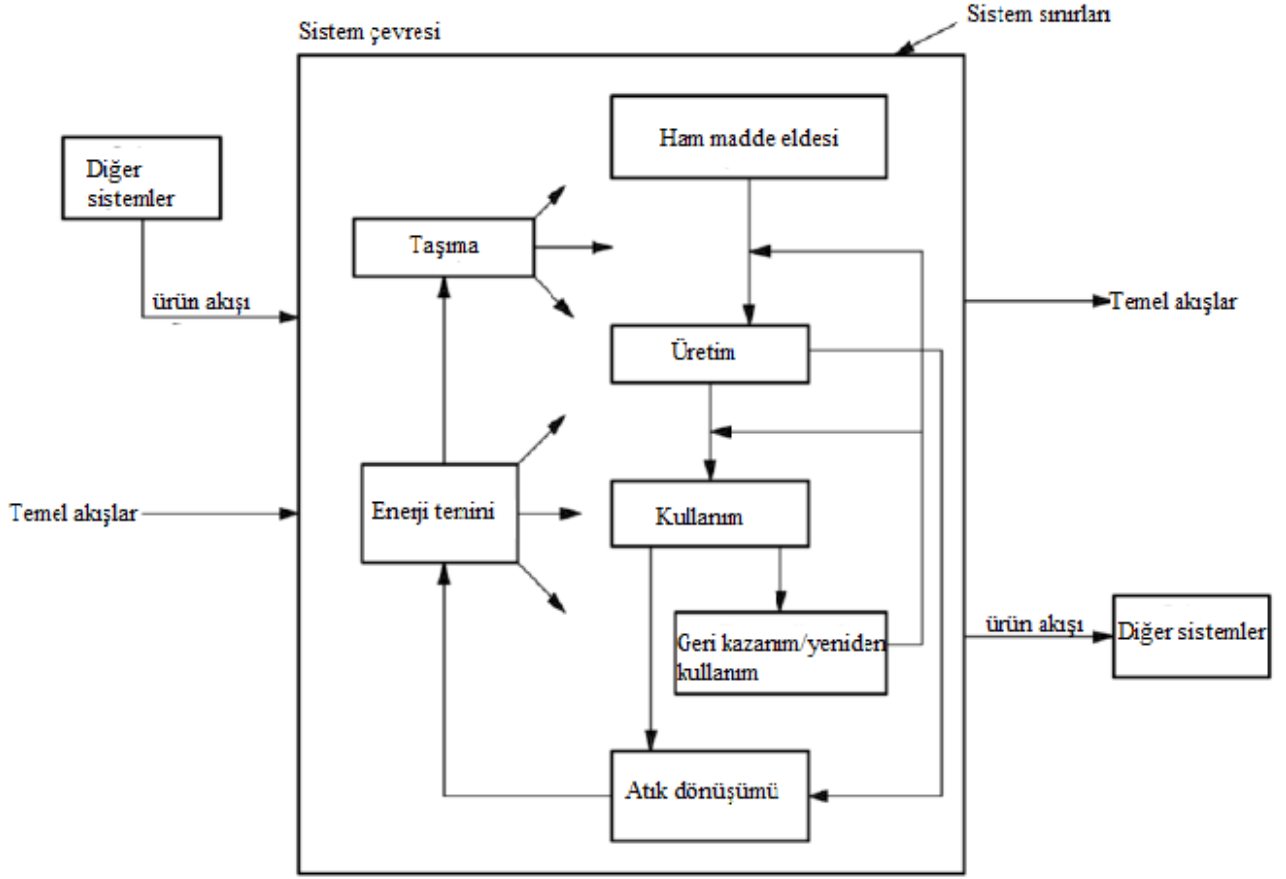
birim akışı ifade etmektedir. Fonksiyonel birim, çalışma şartları altında ürünün karakteristiğini doğru bir şekilde yansıtmalı ve aynı zamanda çalışmanın amacı ve kapsamı için kolay ölçülebilir olmalıdır. LCA çalışmasında fonksiyon, fonksiyonel birim, LCA sonuçları arasındaki bağlantıyı açıklayıcı örnekler Tablo 3.3’de verilmiştir. (Matthews vd.,2014)

Tablo 3.3. LCA çalışmasında fonksiyon, fonksiyonel birim, LCA sonuçları arasındaki bağlantı

Ürün sistemi	Fonksiyon	Fonksiyonel birim	Örnek sonuç
Enerji santrali	Elektrik üretmek	Üretilen 1 kWh elektrik	kg CO ₂ /kWh
El kurutucu	Elleri kurutmak	1 çift kurutulmuş el	Kurutulmuş bir çift el başına MJ enerji
Ampul	Işık sağlamak	1 saat boyunca 100 lümen ışık	Saatte 100 lümen başına gram civa

LCA’da ikinci önemli husus sistem sınırlarıdır. Sistem sınırları aşağıdaki üç soruya cevap vermelidir (Garcia & Weil, 2016);

1. Coğrafik kapsam: Sistem nerededir?
2. Zamansal kapsam: Sistem ne zaman değerlendirildi? Yaşam döngüsünün hangi aşamalarını içermektedir?
3. Fiziksel kapsam: LCA’nın detay seviyesi nedir? Ön planda sadece alt sistem olabilir. Bu sistem, fonksiyonun gerçekleşmesi için örneğin çalışmadaki ürünün üretilmesi için gereken prodestir. Arka plandaki sistemler de dahil olabilir. Örneğin prodeste kullanılan enerjinin üretilmesi arka plan sistemdir. ISO 14040 üretim sistemi ve sistem sınırları örneği Şekil 3.3’de gösterilmiştir (Matthews vd., 2014).



Şekil 3.3. ISO 14040 üretim sistemi ve sistem sınırları örneği

3.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi

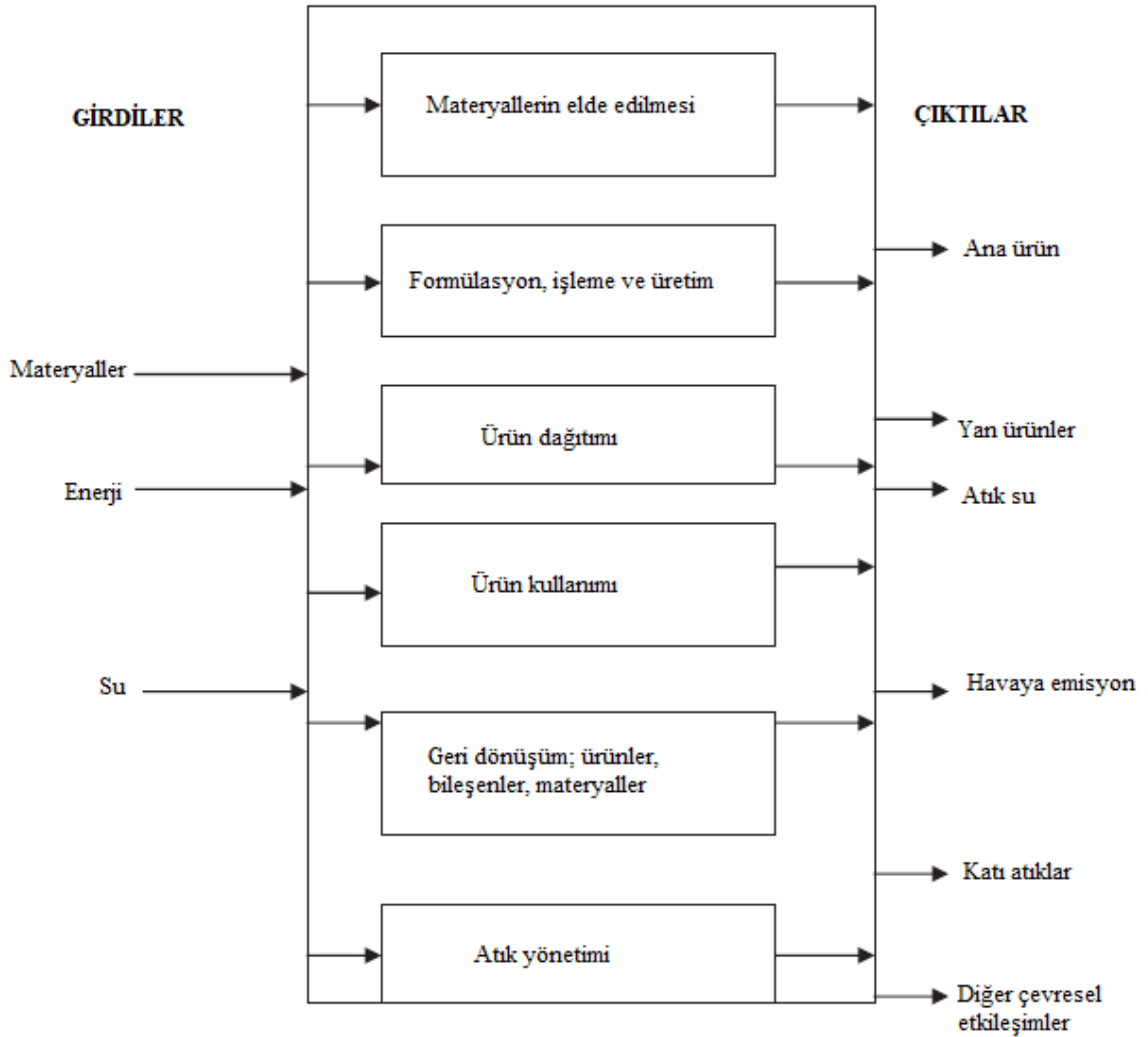
Yaşam döngüsü envanteri (LCI), çalışılan sistemdeki enerji ve maddi akışlarını nicelleştirmek için veri toplama ve hesaplama prosedürlerini içermektedir. Envanter analizi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır (Matthews vd., 2014):

- Amaç ve kapsama bağlı olarak veri toplama hazırlığının yapılması,
- Verilerin toplanması,
- Verilerin doğrulanması,
- Verilerin paylaşılması (gerekliyse),
- Birim sürece ilişkin veriler,
- Fonksiyonel birime bağlı veriler,
- Verilerin birleştirilmesi.

Sistem sınırı içerisindeki her bir birim süreç için veriler, aşağıdaki ana başlıklar altında sınıflandırılmaktadır:

- Enerji girdileri, ham madde girdileri, yardımcı girdiler, diğer fiziksel girdiler,
- Ürünler, yan ürünler ve atık,
- Havaya verilen emisyonlar, suya ve toprağa olan deşarj
- Diğer çevresel boyutlar

LCA'da girdilerdeki enerji ve materyallerin miktarı ve çıktılardaki ürün ve emisyonların miktarı nicel olarak belirtilmektedir. Yaşam döngüsü değerdendirme envanter analizinin bileşenleri Şekil 3.4'de gösterilmiştir. LCA'da kullanılan temel teknik modelledir. Envanter aşamasında bir ürünün elde edilmesi, taşınması, kullanımı ve bertarafından oluşan karmaşık bir sistemden model yapılmaktadır. Bunun sonucunda tüm işlemlerin birbirine bağı olduğu iş akım şeması veya proses ağacı oluşturulur. Her bir proses için girdiler ve çıktılar toplanır.



Şekil 3.4. Bir yaşam döngüsü envanter analizinin bileşenleri

LCA'nın gerçekleştirilmesinde en zorlu aşama veri toplama aşamasıdır. Veri toplama, kaynaklara bağlı olarak yürütülen bir aşamadır. Veri toplama aşamasının uygulanmasındaki zorlukların, kapsam belirlemede göz önünde bulundurulması gerekmektedir (ISO 14040, 2007). Mevcut zamana ve bütçeye bağlı olarak verileri toplamak için çeşitli stratejiler vardır. Veriler iki türe ayrılmaktadır:

1. Ön plan verileri
2. Arka plan verileri

Ön plan verileri sistemi modellemek için gereken en temel verileri ifade eder. Tipik olarak belirli bir üretim sistemini veya üretim sisteminin özel bir aşamasını tanımlayan verilerdir.

Arka plan verileri, genellikle materyaller, enerji, ulaşım ve atık yönetimi aşamalarına ait verilerdir. Bu veriler tasarım dokümanlarından, bilimsel literatür ve Ecoinvent gibi LCI veri tabanlarından alınmaktadır. Bütün LCA'da olduğu gibi LCI'nin oluşturulması da tekrarlanan bir süreçtir. Veri toplama sürecinde ulaşılabilen bilgiler değiştikçe çalışmanın amacı ve kapsamı da değişebilir. Diğer taraflardan veri toplamak genellikle kolay değildir. Veri toplama aşamasında aşağıdakilerin dikkate alınması önemlidir:

- Veri temini, taraflarla olan ilişkilerle bağlantılıdır. Bazı taraflar ortak amaçlar olması doğrultusunda veri temini için kolaylık sağlayabilmektedir. LCA faaliyetlerinin tehdit olarak değerlendirilmesi düşüncesi ile veri paylaşımı yapılabilir. Bazı durumlarda tarafların karşılıklı güveni ile kolaylıkla veriler temin edilir.
- Gizlilik konusu çok önemli olabilir.
- Endüstri sektörünün her birinde terminoloji konusu vardır. Farklı ölçüm birimleri ve ifade etme yolları kullanılabilir. Bir anket düzenlemesi yalnızca bir sektör için geçerli olabilir.
- Anketler genellikle veri toplama aracı olarak kullanılır. Bir anketin geliştirilmesine özen gösterilmeli ve hedef kitleye iyi bir şekilde değinilmelidir.

Veriler toplandıktan ve analiz edildikten sonra ekonomik ve kütle dengesi çalışmaları yapılır (Muralikrishna & Manickam, 2017).

Veri toplama aşamasından sonra verilerin doğruluğu, verilerin birim süreçlerle ilişkisi, verilerin fonksiyonel birim ile ilişkisini içeren değerlendirme prosedürleri her bir

birim süreci ve modellenecek sistemin tanımlı fonksiyonel birimine bağlı envanter sonuçlarını elde etmek için gerekmektedir. Enerji akışlarının hesaplanması, kullanılan farklı yakıtlar ve elektrik kaynakları, enerji akışının dağıtımı ve dönüşüm verimliliği, enerji akışının üretimi ve kullanımına ilişkin girdi ve çıktılar göz önünde bulundurulmaktadır (ISO 14040, 2007).

Birden fazla sürece sahip sistemlerde girdi ve çıktılarına bağlı olarak birden fazla ürün, yan ürün ve atık oluşmaktadır. Bu durumlarda LCA çalışması için paylaşırma prosedürü uygulanmaktadır. Paylaşırma yöntemleri:

- Ekonomik dağılım: Çevresel etkiler, bir prosesin girdi ve çıktıları arasında ekonomik değere göre bölünmüştür. Ekonomik paylaşırma, ürün veya hizmetlerin sağladıkları katma değerlere bağlı olarak yaşam döngüsünün her aşamasında değerlendirilen çevresel etkileri paylaşırır. Sosyal faydalar ve kayıplar bu yaklaşımda dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle bu yaklaşımda çevresel etki kategorilerine olan katkılar para birimi ile ifade edilmektedir. Örneğin küresel ısınma potansiyeline olan katkı kg CO₂ ed/ € ile ölçülmektedir. Ekonomik paylaşırma yönteminin dezavantajı, ekonomik değişimlerden güçlü bir şekilde etkilenmesidir. Bu nedenle bir yıldan diğerine olan sonuçların karşılaştırılması zor olabilmektedir. Ekonomik paylaşırma yönteminin uygulanmasının nedeni fiyatlardaki değişkenlik, para biriminin değişmesi ve enflasyondur (Alberti, vd., 2019).
- Fiziksel dağılım: Yaşam döngüsü envanterinin temeli bir sistemin değerlerinin gerçek değerleri temsil edecek şekilde modellenmesine dayanmaktadır. Bazı proseslerde ele alınan birincil çıktı ile birlikte başka çıktılarda oluşmaktadır. Fiziksel dağılım yönteminde ikincil çıktılar diğer bir deyişle yan ürünlerin sistem sınırları içerisinde etkilerinin kapsam dışında tutulması sağlanmaktadır. Böylece yalnızca birincil ürüne ait olan çevresel yük belirlenmektedir (Drive, 2006).

3.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

LCIA, envanterin temel akışını (emisyonları ve ekstraksiyon kaynaklarını) farklı çevresel etkileri belirli bir puanlandırma sınırları içerisinde küresel ısınma, toksisite gibi kategorilere dönüştürmektedir. Bunun için ISO standartları aşağıdaki ilk 3 aşamayı zorunlu kılmakta olup, 4. ve 5. aşamalar ise isteğe bağlıdır (Garcia & Weil, 2016).

1. Etki kategorilerinin seçimi: Bu çalışmanın amacına göre yapılmaktadır. Her kategori için bir yöntem seçilmektedir. Etki kategorileri genel olarak orta nokta ve son nokta olarak sınıflandırılmaktadır. Orta nokta kategorileri iyi tanımlanmış bir neden ve sonuç ilişkisini (örneğin, asitleştirme, ötrofikasyon) yansıtmaktadır. Son nokta kategorileri, ekosistem çeşitliliğine zarar verme veya insan sağlığına zarar verme gibi daha geniş etkileri kapsamaktadır.

2. Etkilenen etki kategorisine bağlı olarak farklı emisyonların sınıflandırılması: Birkaç madde, çeşitli etki kategorilerini etkileyebilmektedir. Sınıflandırma, materyal ve enerji akışına bağlı olarak envanter analizindeki ham veriler ile yapılmaktadır. Bu veriler göz önüne alınarak önerilen çevresel endişelerin belirlenmesiyle sınıflandırma yapılır. Örneğin, petrol beslemesi yapılan endüstriyel bir prosesten kaynaklanan emisyonlar metan, butan, formaldehit olarak bilinmektedir. Buna göre sınıflandırma sırasıyla küresel ısınma, duman oluşumu ve insanlar üzerine toksisite olarak yapılabilir (Muralikrishna & Manickam, 2017).

3. Karakterizasyon: Her bir akışla ilişkili etkinin miktarının belirlenmesidir. Bu, akış miktarını bir karakterizasyon faktörü ile çarpma suretiyle yapılmaktadır. Bir karakterizasyon faktörü, belirli bir etki kategorisi için bir temel akışın önemini sayısal bir temsilidir. Sonuç, o kategoride ortak bir metrik olarak ifade edilmektedir. Bu metrik, örneğin küresel ısınma durumunda kg CO₂ eşdeğeri gibi bir referans maddedir (Garcia & Weil, 2016).

4. Normalizasyon: Referans bir senaryodaki ile çalışmadaki potansiyel etki kategorilerinin karşılaştırılmasıdır. Referans genellikle belirli kökenli (dünya geneli, Batı Avrupa, vs.) ortalama bir kişinin yıllık etkisidir. Kategoriler arasında uygun bir karşılaştırma için, aşağıdaki adımın gerçekleştirilmesi gerekmektedir, ancak bu tür karşılaştırma, ortak bir ölçekte farklı çarpma kategorileri getirmektedir.

5. Ağırlıklandırma: Tüm etki kategorilerinin öznel ölçütler kullanılarak tek bir puana dönüştürülmesi, bunların arasında, diğerlerinin yanı sıra, uzman görüşü, parasallaştırma veya politika hedefleri de bulunmaktadır

CML, TRACI veya ReCiPe gibi kullanıma hazır LCIA yöntemleri, ötrofikasyon, küresel ısınma veya tatlı su ekotoksitesitesi gibi çok sayıda etki kategorisini ve çok sayıda madde için karakterizasyon faktörünü içermektedir. Sonuç olarak, çoğu LCA uygulayıcısı yalnızca hangi yöntemi kullanacaklarını seçmek ve normalizasyon ve ağırlıklandırma aşamalarını dahil edip etmeyeceklerini belirlemek zorundadır.

3.4. Sonuçların Yorumlanması

Bu son aşamada hem LCI hem de LCIA'nın sonuçları, çalışmanın amacı ve kapsamıyla tutarlı sonuçlar ve önerilere ulaşmak için tartışılmaktadır. LCA'nın bu özelliği, bu aşamalardan birinin sonuçlarının başka bir aşamada yeni yaklaşımlar önerme veya çalışmanın kapsamının yeniden tanımlanmasını sağlamaktadır. Yorumlama aşaması genellikle duyarlılık analizi, belirsizlik analizi veya yeni senaryoların analizini kullanarak, kalitesini değerlendirerek sonuçların tanımlanmasının ötesine geçmektedir (Garcia & Weil, 2016).



4. KONU İLE İLGİLİ LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

AEEE yönetiminde LCA yöntemi pek çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır.

Bigum vd. (2012) tarafından alüminyum, altın, bakır, paladyum, nikel ve gümüş içeren yüksek nitelikli AEEE'lerden metal geri kazanımının LCA çalışması yapılmıştır. Çalışmada geri kazanım için Boliden Rönkar tesisine ait iş akımına göre modelleme yapılmıştır. AEEE'ler ön işlemeden sonra Kaldo fırınına alınıp kurşun geri kazanımı sağlanmıştır. Kalan eriyik dönüştürücü koridoruna alındıktan sonra anot rafineri tesisine aktarılmış ve bakır ve nikel sülfat geri kazanılmıştır. Kıymetli metal rafinerisinde ise altın, gümüş ve paladyum geri kazanılmıştır. LCA çalışması için geri kazanım verileri EASEWASTE veri tabanından ve Avrupa verilerinden alınmıştır. Çalışmanın fonksiyonel birimi bir ton yüksek nitelikli AEEE'lerden alüminyum, bakır, altın, demir, nikel, paladyum ve gümüş geri kazanımı olarak belirlenmiştir. LCA çalışması sonucunda, miktarları az olmasına rağmen kıymetli metallerin geri kazanımı sağlandığı için AEEE geri dönüşümünün önemli derecede etkili olduğu görülmüştür. Çalışmanın sonunda metal cevherlerinin çıkarılması ve rafine edilmesi yerine AEEE'lerden ikincil materyal geri kazanımının çevresel etki kategorilerine olan katkıyı azalttığı görülmüştür.

Rubin vd. (2014) tarafından BDK'dan iki farklı bakır geri kazanım stratejisini karşılaştırmak için LCA çalışması yapılmıştır. Bakır geri kazanımı işleminde mekanik işlemlerden sonra elektrokimyasal proses aşamasında karşılaştırma için sülfürik asit ve kral suyu (nitrik asit ve klorik asit) kullanılmıştır. Çalışmada ilk olarak BDK'lar küçük parçalar haline getirilmiş, manyetik olmayan parçalar ayrılmış, parçalar asit solüsyonu içerisinde çözüldükten sonra bakır eldesi için elektro rafine işlemi yapılmıştır. Çalışmada fonksiyonel birim 102 gram bakırın geri kazanımı olarak belirlenmiştir. Çalışmadaki etki kategorileri Endüstriyel Ürünlerin Çevresel Dizaynı (Environmental Design of Industrial Products-EDIP)'na göre küresel ısınma, stratosferik ozon incelmesi (stratospheric ozone depletion-SOD), asidifikasyon, sucul ötrofikasyon, karasal ötrofikasyon ve yenilenebilir enerji tüketimi olarak belirlenmiştir. Çevresel etkiler incelendiğinde kral suyunun çevresel etki kategorilerine daha az katkı yaptığı görülmüştür.

Hong vd. (2015) tarafından e-atık geri dönüşümünün çevresel etkilerini belirlemek için LCA çalışması yapılmıştır. Çalışmada, geri dönüşüm, düzenli depolama ve yakma senaryoları karşılaştırılmıştır. AEEE'lerin bertaraf edilmesinin, insanlar üzerine toksisite, karasal toksisite, tatlı su ekotoksitesitesi ve deniz ekotoksitesitesine olan düşük çevresel yük oluşturması nedeniyle çevreye faydalı olduğu görülmüştür. AEEE'lerin düzenli

depolanmasının, bertaraf senaryosuna göre daha az çevresel yüke sahipken e-atıkların yakılmasının bertaraf senaryosundan daha fazla çevresel yüke sahip olduğu açıklanmıştır.

Zubiani vd. (2017) tarafından AEEE'lerin hidrometalurjik proses ile geri dönüşümündeki çevresel etkileri incelemek için LCA çalışması yapılmıştır. Çalışmada hidrometalurjik yöntem kullanılan küçük bir AEEE geri dönüşüm tesisi tasarlanmıştır. Pilot tesiste zengin metal içeriğine sahip olması, kısa işlem süresi gerektirmesi ve yüksek ürün hacmine sahip olması nedeniyle cep telefonu BDK'ları seçilmiştir. Proseste iki farklı liç aşaması ele alınmıştır. Çalışmada fonksiyonel birim 100 kg cep telefonu BDK olarak belirlenmiştir. Liç aşamasında nitrik asit ve kral suyu kullanılmış olup çoğunlukla bakır, gümüş ve altın geri kazanımı sağlanmıştır. LCA çalışmasından beşikten kapıya yaklaşımı tercih edilmiştir. Çalışma için SimaPro 8.0 yazılımı kullanılmıştır. Enerji, ulaşım ve materyal üretimi ile ilgili veriler Ecoinvent 3.1 veri tabanından alınmıştır. Çalışmadaki metod CML-IA 3.01 olarak seçilmiştir. Çalışmada, abiyotik kaynakların tükenmesi (Abiotic depletion-ADP), küresel ısınma potansiyeli (Global warming-GWP), ozon tabakasının incelmeye potansiyeli (Ozone layer depletion-ODP), insanlara olan toksik etki potansiyeli (Human toxicity-HTP), tatlı su ekotoksikite potansiyeli (Fresh water aquatic ecotoxic-FAETP), deniz ortamına ekotoksikite potansiyeli (Marine aquatic ecotoxic-MAETP), karasal ekotoksikite potansiyeli (Terrestrial ecotoxic-TETP), fotokimyasal oksidasyon potansiyeli (Photochemical oxidation-FOP), asidifikasyon potansiyeli (Acidification-AP) ve ötrofikasyon potansiyeli (Eutrofication-OP) etki kategorileri kullanılmıştır. Nitrik asit ile liç işleminden sonra adsorpsiyon için aktif karbon kullanılmış olup bakır elde etme verimi %53,99 olarak belirlenmiştir. Kral suyu %63 nitrik asit ve %37 hidroklorik asitten oluşmaktadır. Kral suyu ile liç işleminden sonra elektrokaplama yöntemi ile %95 oranında altın geri kazanımı sağlanmıştır. Çalışmada ekonomik ve küresel paylaşırma prosedürü uygulanmıştır. LCA sonuçlarına göre temel proses çevresel etki kategorilerine katkı yapmaktadır. Ancak adsorpsiyon aşamasının iyileştirilmesinin olumlu yönde katkı sağlayabileceği açıklanmıştır.

Ghodrat vd. (2017) tarafından atık BDK'larda bulunan altın, bakır, gümüş gibi kıymetli metallerin geri kazanım prosesinin çevresel etkileri incelenmiştir. Geri dönüşüm prosesi hakkında tahminde bulunmak için termodinamik analiz yapılmıştır. İki farklı senaryoya ait çevresel etkilerin karşılaştırılması için yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmada ele alınan senaryolar ilk olarak atık BDK'lardan bakır geri kazanımı olup ikinci senaryo AEEE dışındaki kaynaklardan bakır geri kazanımı olarak

belirlenmiştir. Çalışmanın sonucu AEEE kullanımının çevresel etkilerine bağlı olarak kıymetli metal geri kazanımı için ergitmedeki bakır hurdasına, besleme materyali ile ergitme arasındaki mesafeye ve elektrik kaynağına bağlıdır. Birinci senaryoda nikel, kurşun, çinko gibi metal tozlarının daha fazla rafine edilmesi gerektiğinden iklim değişikliği, tatlı su ötrafikasyonu, fosil tüketimi kategorilerine olan etkinin ikinci senaryodan oldukça fazla olduğu görülmüştür. Elektrik tüketiminin %10 azaltılmasıyla, birinci senaryonun tüm kategoriler için daha fazla fayda sağlayacağı belirtilmiştir.

Duflou vd. (2018) tarafından fotovoltaiik (PV) panellerden materyal geri kazanım yöntemi senaryoları karşılaştırılmıştır. Temel senaryo olan yıkıcı ayırmada fotovoltaiik paneller AEEE geri dönüşüm tesisinde kırıcıdan geçirildikten sonra manyetik alanda çelik parçalar ayrılmakta, eleme ve eddy akımı ile alüminyum ayrılmakta, metalürjik geri kazanım ile bakır ve gümüş ayrılmakta ve endüksiyon ayırıcı ile camlar ayrılmaktadır. Termal ve kimyasal dönüşüm senaryosunda 400°C’de polimerlerin, PV hücrelerin ve cam tabakasının ayrılmasından sonra HNO₃ kullanılarak kimyasal dönüşüm ile PV hücrelerden metallerin geri kazanımı sağlanmıştır. Seçici mekanik ayırmada, elektrik bağlantı kutuları ayrıldıktan sonra kalan sandviç yapıdan cam ve alüminyum ayrılmıştır. Güneş pili ve polimer içerikli kalan yapıdan kıymetli metallerin alınması için eritmede polimer materyaller uzaklaştırılmıştır. %95’den fazla gümüş ve bakır elde edilmektedir. Karşılaştırmanın sonucunda iyi tasarlanmış bir demontaj ile seçici mekanik ayırma senaryosunun çevresel etkilerinin daha az olduğu, yüksek oranda gümüş geri kazanımı sağladığı için ekonomik olarak da en faydalı senaryo olduğu belirtilmiştir.

Gonda ve Degrez (2018) tarafından çevresel endişelerden ve yeni yasal gerekliliklerden hareketle, atık elektrikli ve elektronik eşyaların toplama oranlarının artmasının hedeflenmesiyle Brüksel’deki bilgisayarların yaşam sonu değerlendirme zincirlerinin çevresel etkilerini LCA çalışmasıyla karşılaştırılmıştır. İlk zincir, Belçika’ daki üreticiler adına geri toplamaktan sorumlu dernek tarafından yönetilmektedir. İkincisi, yeniden kullanıma öncelik veren ve AEEE’nin mekanik işlemde önce manuel olarak ayrılabilen parçalarının derinlemesine ayrılmasını destekleyen Çalışma Entegrasyonu Sosyal Girişimleri (Work Integration Social Initiatives-WISE) tarafından yürütülmektedir. Sonuçlar, ikinci zincirin, yeniden kullanımı sağlaması ve daha yüksek malzeme geri kazanım oranı sayesinde, öncesine kıyasla %69’a varan bir çevresel avantaj sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, çevresel performansı iyileştirmek için, WISE’in

etkinliğinin artırılması ve özellikle yeniden kullanım ve manuel demontajın teşvik edilmesi gerektiği görülmüştür.

Gu vd. (2019) tarafından Çin'deki mevcut katı atık yönetimini kolaylaştırabilmek amacıyla bireylerin "internet + geri dönüşüm" adlı atık yönetim modeliyle resmi atık toplama kanallarına doğrudan ulaşabilmelerini sağlayan Aibolv mobil uygulamasının çevresel fayda getirip getirmeyeceğini belirlemek için LCA çalışması yapılmıştır. Mobil uygulamadaki altı ay içerisinde gerçekleşen tüm işlemler malzeme akış analizini (Material Flow Analysis-MFA) ve yaşam döngüsü değerlendirmesini birleştiren metodoloji ile modellenmiştir. Çin'deki mevcut katı atık yönetimi mevzuatına göre katı atıklar üçe ayrılmıştır; T1-televizyon ve buzdolabı gibi mali destekli elektrikli elektronik atıklar, T2-cep telefonu gibi mali desteği olmayan elektrikli elektronik atıklar, T3-kâğıt ve kumaş gibi diğer geri dönüştürülebilir atıklar olarak belirlenmiştir. MFA sonuçlarına göre cam, değerli metaller ve batarya metallerinin AEEE'lerden geri kazanıldığı, plastiklerin ve yaygın metallerin ikincil olarak baskın malzemeler olduğu görülmüştür. LCA sonuçlarına göre T₂ atığının geri dönüştürülmesinin büyük hacimde kıymetli metallerin geri kazanılmasından dolayı çevresel anlamda yüksek fayda sağladığı, artan üretim oranları olumsuz etkiye sebep olurken, atık cep telefonu miktarındaki artışın da önemli ölçüde etkili olduğu, potansiyel çevresel yüklerin temel olarak ikincil malzemelerin ve enerjinin geri kazanıldığı bertaraf yöntemleriyle bağlantılı olduğu, yaygın metaller, değerli metaller ve batarya metalleri gibi metalik fraksiyonların geri kazanımının, çevresel faydanın önemli bir kısmına katkıda bulunduğu belirlenmiştir.

Fiore vd. (2019) tarafından İtalya'da bulunan hem manuel demontaj hem de fiziksel ve mekanik işlemlerde gelişmiş, Avrupa Birliği (AB) endüstriyel süreçler taslağı hakkında temsilci olan bir AEEE işleme tesisinin yönetimindeki e-atıkların malzeme akış analizi ve yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmıştır. AB'de en çok rastlanan üç e-atık grubu incelenmiştir. Bunlar; R₁: soğutucu cihazlar, R₂: büyük ev aletleri, R₃: televizyon ve ekranlardır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi için iki farklı senaryo dikkate alınmıştır. Birincisi (S₀), İtalya'da klasik olarak yapılan, değerli materyallerin geri dönüşümünün sağlanıp kalan atıkların düzenli depolamada bertaraf edildiği senaryodur. İkincisi (S₁), değerli materyallerin geri dönüşümünün sağlanıp kısmen yakma ve kalan atıkların düzenli depolamada bertaraf edildiği senaryodur. Üç geri dönüşüm hattına ait kütle dengesine göre geri dönüşüm oranları şöyledir; R₁ için S₀: %40, S₁: %80, R₂ için S₀: %65, S₁: %99, R₃ için S₀: %86, S₁: %91, yalnızca R₁ için önemli kısımlar yakma tesislerine

veya düzenli depolamaya sevk edilmektedir. Poliüretan ve kauçuklar yakma tesisine, floresan tozları ve kondansatörler depolama sahasına gönderilmiştir. Yaşam döngüsü değerlendirmesinde atıkların toplanması, ayrılması, geri dönüşümü, yakılması ve bertaraf edilmesi aşamaları dikkate alınmıştır. Analiz sonucuna göre en geri dönüştürülebilir e-atıklar R_2 ve R_3 'dür. Her üç geri dönüşüm hattı ve her iki senaryo için en fazla etkiye sahip olan çevresel etki kategorileri tatlı su ve deniz suyu ekotoksitesidir. Çevresel fayda sağlayan geri dönüşüm materyalleri R_1 için demir ve çelik, R_2 için demir, çelik ve bakır, R_3 için baskılı devre kartlarından elde edilen kıymetli metaller olarak açıklanmıştır. Çevresel etki kategorilerine olumsuz yönde katkı yapan durumlar ise atıkların toplama alanlarından atık işleme tesisine olan transferi ve poliüretan ve kauçuğun yakılmasıdır. Sonuç olarak poliüretan ve kauçuk geri dönüşümü için yeni çalışmalar yapılması gerektiğine ve atık işleme tesisine yakın toplama alanları oluşturulabileceğine karar verilmiştir.

Yu vd. (2019) tarafından atık LCD panellerin geri dönüşüm tekniklerini incelemek için yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışması yapılmıştır. LCD paneller hem tehlikeli hem de geri dönüştürülebilir sıvı kristal, cam panel, kıymetli ağır metaller gibi pek çok çeşit materyal içermektedir. Laboratuvarında kullanılan geri dönüşüm teknikleri, kırma, hidrotermal prosesler ve asit liçidir. Bu tekniklerin çevresel etkileri ReCiPe 2008 ve Eco-Indicator 99 (EI'99) metodları kullanılarak değerlendirilmiştir. ReCiPe değerlendirme sonuçları ile geri dönüşüm tekniklerindeki olumsuz çevresel etkilerin hidrojen peroksit ve kerosen kullanımı için gerekli olan elektrik tüketiminden kaynaklı olduğunu gösterilmiştir. Geri dönüşüm prosesleri metal kaynakların tükenmesi çevresel etki kategorisinde olumlu etki sağlamaktadır ancak karasal asidifikasyon, insanlar üzerine toksisite ve partikül madde oluşumu kategorilerinde olumsuz etkiye neden olmuştur. EI'99 analizi, LCD panel geri dönüşüm tekniklerinin insinerasyon ile karşılaştırıldığında olumsuz çevresel etkilerin %91,5-%97,3 gibi ciddi oranda azaldığı ortaya çıkarılmıştır.

Meester vd. (2019) tarafından Belçika'daki AEEE durumunu değerlendirmek için LCA ve malzeme akış analizi kullanılarak bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada, bölgedeki tüketicilerin AEEE'leri yeniden kullanarak, geri dönüşüme göndererek ve insinerasyon veya düzenli depolama tesislerine göndererek yönettiği düşünülmüştür. Fonksiyonel birim 1 kg AEEE olarak belirlenmiştir. Çalışmada AEEE'lerin yalnızca %32'sinin geri dönüşüme gönderildiği, %68'inin düzenli depolama, insinerasyon ve basit uygulamalarla kaybolduğu sonucuna varılmıştır. Demir ve alüminyum, bakır gibi demir olmayan metal

bileşenlerin geri kazanım oranlarının sırasıyla %54, %46 ve %44 olduğu, kıymetli metaller ve plastiklerin ise %21-38 ve %20 oranında olduğu görülmüştür. Çalışmanın sonucunda materyal geri kazanımının geliştirilmesinin, tüketici davranışlarının iyileştirilmesinin ve teknolojik gelişmelerin çevresel etki kategorilerine olan etkiyi azaltıp çevresel fayda sağlayacağı belirtilmiştir.

Bu tez çalışmasında, AEEE ve LCA ile ilgili yapılan literatür çalışmalardan farklı olarak, atık BDK'lardan farklı geri dönüşüm yöntemleri kullanılarak bakır geri kazanımına yönelik karşılaştırmalı bir LCA çalışması yapılmıştır.



5. LCA UYGULAMASI

Tezin bu kısmında uygulanan LCA yöntemi, ISO 14040 ve ISO 14044 ilkelerine bağlı olarak hedef ve kapsamın belirlenmesi, envanter analizi, etki değerlendirme ve yorumlama olarak dört aşamada ele alınmıştır.

5.1. Hedef ve Kapsam Tanımı

Bu tez çalışmasında, BDK'lardan endüstriyel ve deneysel bakır geri dönüşüm yöntemlerinin çevresel etkilerinin LCA analizi yöntemiyle karşılaştırılması hedeflenmiştir. Karşılaştırılacak yöntemleri, Peirce Smith (pirometalurjik-endüstriyel yöntem), Kayser (pirometalurjik-endüstriyel yöntem) ve pirolitik-biyometalurjik (deneysel yöntem) geri dönüşüm yöntemleri oluşturmaktadır.

Bu karşılaştırma için fonksiyonel birim her üç yöntem sonucunda elde edilen "1 kg bakır" olarak seçilmiştir.

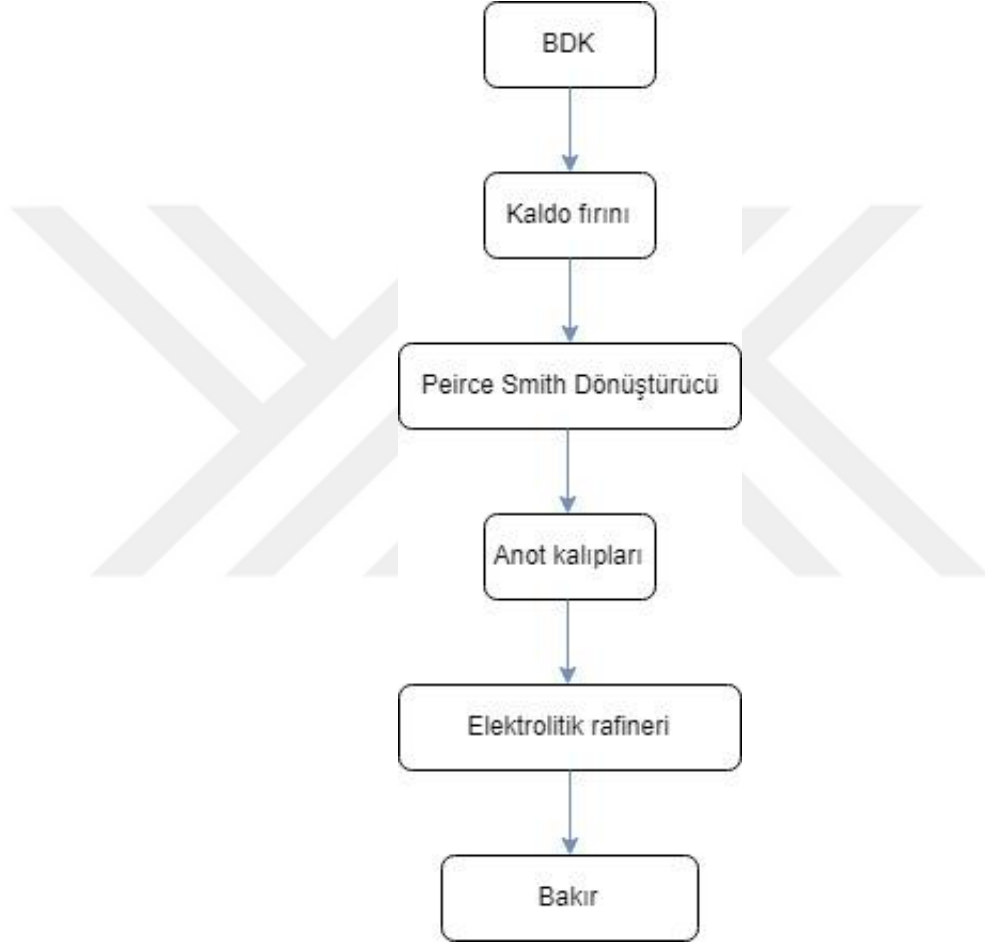
5.1.1. Sistemlerin tanıtımı

Karşılaştırılacak olan BDK'lardan bakır geri dönüşüm yöntemleri detaylı olarak aşağıdaki bölümlerde anlatılmıştır.

5.1.1.1. Peirce Smith geri dönüşüm yöntemi

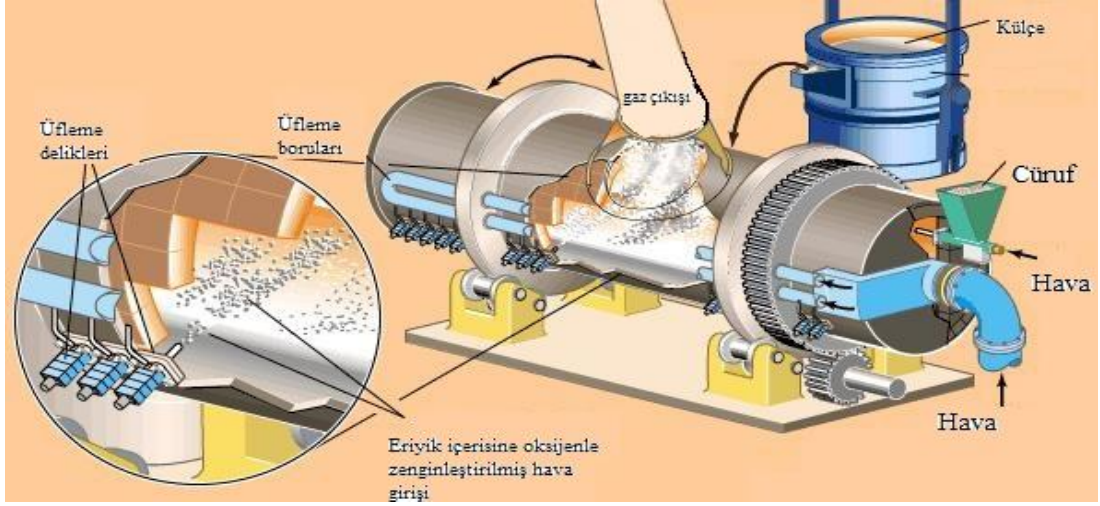
Bakır ürününün ileri teknoloji gerektiren üretimlerde, bilimsel çalışmalarda, yüksek iletkenliğin gerekli olduğu yerlerde kullanılması durumunda tamamen saf olması beklenmektedir. Blister bakır, safsızlığı tamamen sağlanmamış, yapısında gaz gözenekleri bulunan bakır demektir (http-1) (http-2). Peirce Smith (PS) dönüşüm prosesi, blister bakır saf bakıra dönüştürmek için kullanılan en yaygın yöntemdir. Proses cüruf üfleme ve bakır üfleme olmak üzere iki aşamada yürütülmektedir. Bu iki aşama boyunca hava veya oksijenle zenginleştirilmiş hava ocak içerisindeki ince borularla eriyik içine enjekte edilmektedir. Başlangıç materyaline bağlı olarak cüruf üfleme aşamasının iki kez tekrarlanması gerekmektedir. Materyal ilavesini cüruf sıyırma işlemi takip etmektedir. Cüruf üfleme aşaması boyunca oksijen ilavesiyle demir oksitten (Fe_2O_3) demir sülfata ($FeSO_4$) reaksiyon gerçekleşmektedir. Prosese materyal beslemesi yapıldıkça bu reaksiyon devam etmektedir. Demir oksitten demir sülfata dönüşüm reaksiyonu bittiğinde cüruf fazı oluşmaktadır. Son cüruf üflemesinden sonra kalan eriyik bakır sülfat ($CuSO_4$) içermektedir. Beyaz metal olarak bilinen bu eriyik ve küçük miktarda demir içermektedir.

Beyaz metal, bakır üfleme aşaması boyunca sıvı bakıra dönüştürülmektedir. Soğutma materyali olarak bakır içeren atıkların ve anotlardan reddedilen bakırların kısmi olarak ilave edilmesiyle ekzotermik reaksiyon gerçekleşmektedir. Besleme materyali içerisindeki ve blister bakırdaki istenmeyen maddeler cüruflaştırma ya da buharlaştırmayla uzaklaştırılmaktadır. (Lennartsson A. , 2018). Peirce Smith geri dönüşüm yöntemine ait akım şeması Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



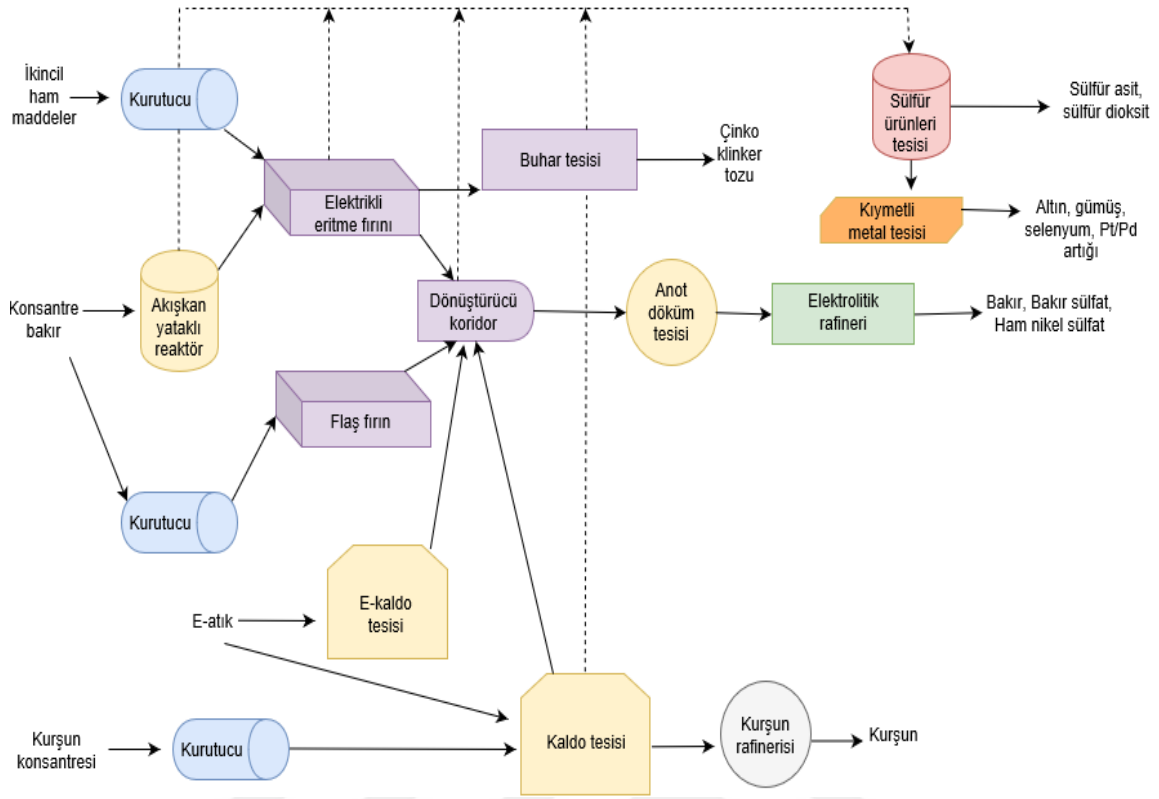
Şekil 5.1. Peirce Smith geri dönüşüm yöntemi akım şeması

Peirce Smith dönüştürücünün şematik görüntüsü Şekil 5.2’de gösterilmiştir (<http-7>).



Şekil 5.2. Peirce Smith dönüştürücünün şematik görüntüsü

Peirce Smith geri dönüşüm yöntemi, İsveç-Rönnskar bölgesinde e-atıklardan bakır geri dönüşümü faaliyeti gösteren Boliden firması tarafından kullanılmaktadır. Tesisin temel ürünleri bakır levhaları, altın, gümüş, granüle edilmiş cüruf, sülfürik asit, sülfür dioksit, çinko klinkeri ve kurşundur. Rönnskar tesisinde 2012 yılında kaldı teknolojisi kullanılmaya başlanmıştır. Kaldı ocağı, eritme işlemi sırasında hafifçe dönen eğik bir silindirden oluşmaktadır. Küçük parçalar halindeki e-atıklar eritme işlemi boyunca ocak girişinden beslenmektedir. Kaldı ocağından çıkan eritilmiş elektronikler, rafine olması için Peirce Smith dönüştürücüye alınmaktadır. Burada tesisin diğer besleme materyalinden gelen ana bakır eriyiğine entegre edilmektedir. Peirce-Smith dönüştürücü ile dönüştürücü koridorunda daha fazla ham madde dönüşümü sağlanmaktadır. Üretilen blister bakır anot fırınına taşınıp elektro rafine için anot kalıplarına dökülmektedir. Elektrolitik rafine işleminden sonra bakır, altın ve gümüş metallerinin geri dönüşümü sağlanmaktadır (Lennartsson A. , 2018). Boliden Rönnskar tesisine ait akım şeması Şekil 5.3'de gösterilmiştir (http-3).



Şekil 5.3. Boliden Rönsskar tesisi akım şeması

5.1.1.2. Kayser geri dönüşüm yöntemi

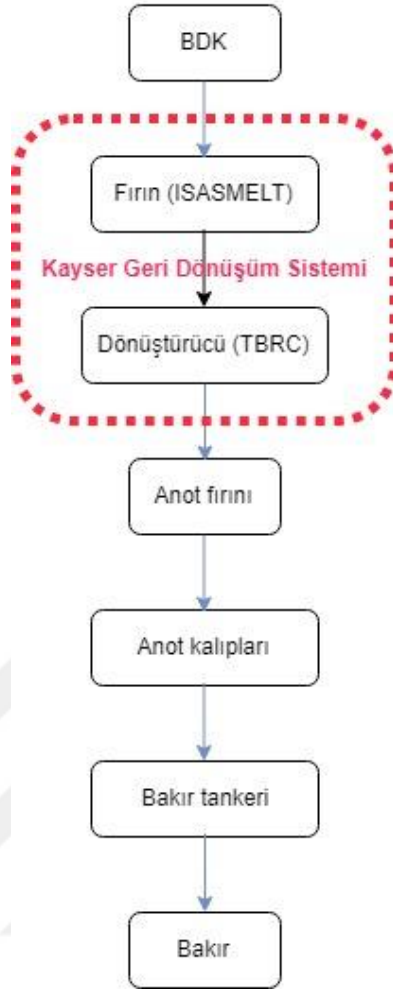
Kayser geri dönüşüm sistemi (KRS), besleme materyali olarak kıymetli metaller içeren geri dönüştürülebilir atıkların ve karmaşık yapıdaki malzemelerin kullanılacağı uygun bir yöntemdir. İlk olarak malzemeler yoğunluk ve kompozisyonuna göre ön işleme tesisine alınıp beslemeye uygun hale getirilmektedir. Pirometalurjik hazırlık (eritme ve rafine) Kayser geri dönüşüm sisteminde başlamaktadır. Temel işlem yaklaşık 13 m yüksekliğindeki düşey fırında gerçekleşmektedir. Fırın şematik olarak Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Bu fırının özelliği, fırına yukarıdan daldırılan ve fırını yakıt, oksijen ve hava ile besleyen borunun kullanılmasıdır. Bu fırında redüksiyon işlemi çok hızlı gerçekleşmekte olup yükleme süresi çok kısadır. Prosesten çıkan demir silikat kumunun bakır içeriği çok düşüktür. Bu bakır kaybının çok düşük miktarda olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.4. Kayser geri dönüşüm yöntemine ait fırının şematik görüntüsü

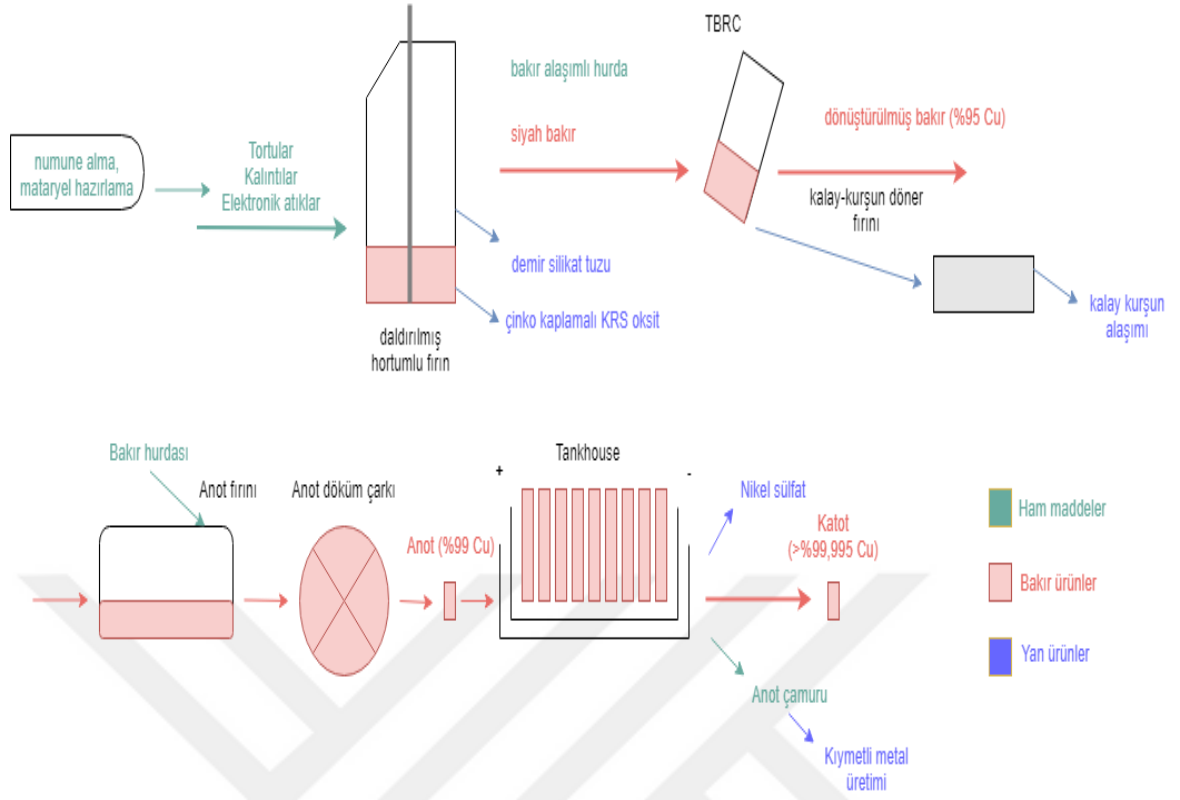
Ham maddede bulunan bakır, nikel, çinko, kurşun ve değerli metaller %80 bakır içeriğine sahip bir alaşımla zenginleştirilmektedir. Bakır içeriği üst üflemlili döner dönüştürücüde (Top blown rotary converter-TBRC) %95'e kadar zenginleştirilmekte ve kalay ve kurşun cüruf halinde ayrılmaktadır. Kalay-kurşun cürufu, kalay-kurşun fırını içerisindeki alaşıma entegre edilmektedir. KRS yönteminde oluşan baca tozu olan KRS oksit içeriğinde çinko bulunmaktadır.

Eriyik haldeki, ortalama %95 bakır içeriğine sahip işlenmemiş bakır anot fırınına alınmaktadır. Eriyik, bakır hurdalarının ilavesiyle rafine edilmektedir. Eriyik başlangıçta hava ile oksidize edilip cüruf ayrıldıktan sonra doğal gaz ile oksijensizleştirilmektedir. Pirometalurjik işlemin sonunda %99 saflıktaki bakır anotlara dökülmektedir. Bu, ikincil bakır üretim prosesine ait son rafine aşamasının başlangıç ürünüdür. İkincil bakır üretim prosesi ürünü olan yüksek dereceli bu bakır levhaları, birincil bakır üretme aşamasından gelen bakır levhaları ile aynı kalitededir. Kayser geri dönüşüm yöntemine ait akım şeması Şekil 5.5'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Kayser geri dönüşüm yöntemine ait akım şeması

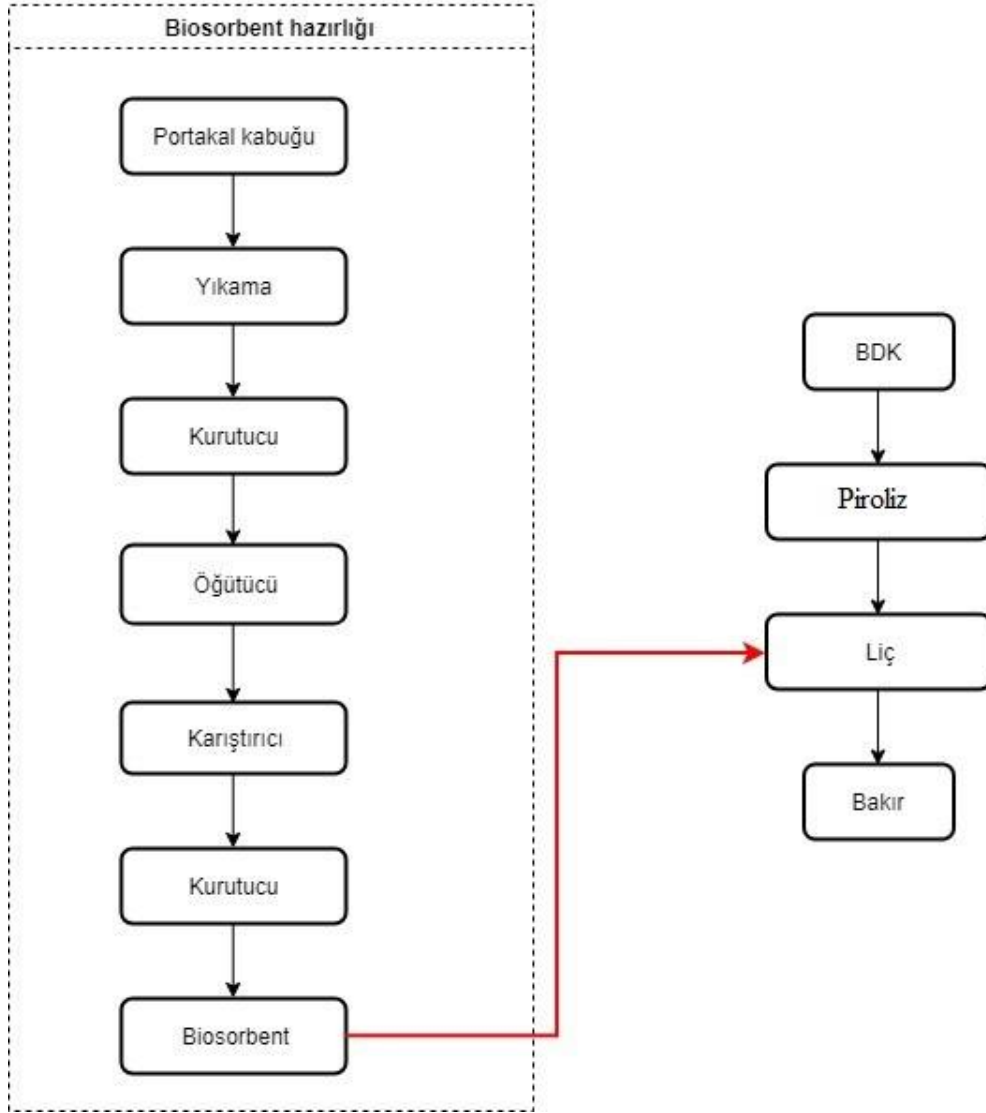
Kayser geri dönüşüm yöntemi Almanya Lünen’de bulunan Aurubis firması tarafından kullanılmaktadır. Kayser geri dönüşüm yöntemine ait akım şeması Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Aurubis firmasında kullanılan Kayser geri dönüşüm yöntemine ait akım şeması

5.1.1.3. Pirolitik-biometalürjik geri dönüşüm yöntemi

Pirolitik-biyometalürjik (PB) yöntem, atık BDK'lardan deneysel olarak gerçekleştirilen bakır geri dönüşümüne dayanmaktadır. Bu yöntem, Özkan vd. (2017)'nin e-atık olan BDK'lardan biyosorpsiyon yoluyla bakır geri dönüşümü yaptıkları deneysel bir çalışmaya dayanmaktadır. Biyosorbent olarak atık portakal kabukları kullanılmıştır. Pirolitik biyometalürjik geri dönüşüm yöntemine ait akım şeması Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7: *Pirolitik-biometalürjik geri dönüşüm yöntemi akım şeması*

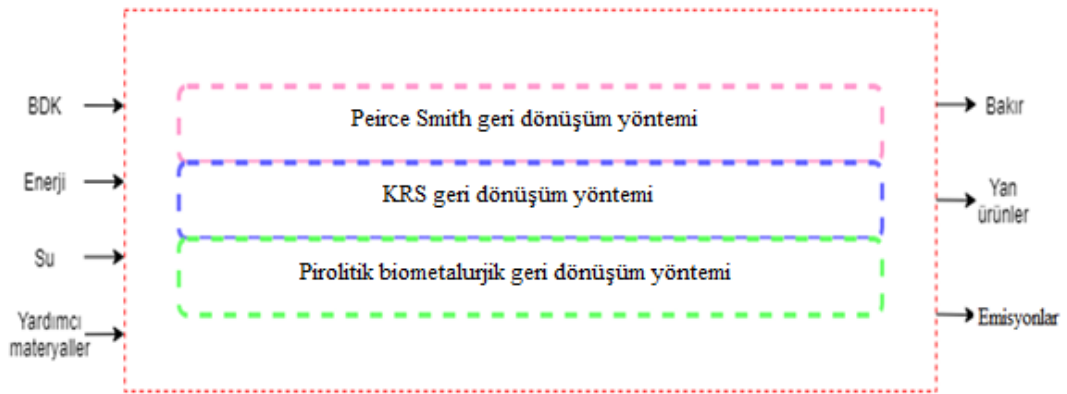
Çalışma, biyosorbentin hazırlanması, BDK'ların pirolizi, piroliz katı ürününün liç edilmesi ve biyosorpsiyon ile liç solüsyonundan bakır geri dönüşümü aşamalarından oluşmaktadır.

- Biyosorbentin hazırlanması: Atık portakal kabukları, öncelikle saf su ile yıkanmış, kurutulmuş ve öğütülmüştür. Öğütülen portakal kabuklarının, sapanifikasyon metodu ile adsorpsiyon kapasitesi artırılmıştır. Bunun için portakal kabukları NaOH çözeltisi ile karıştırılmıştır. Karışım süzülüp, renksiz bir süzüntü kalana kadar saf su ile durulanmış ve etüvde kurutulduktan sonra sapanifikasyon metodu ile iyileştirilmiş portakal kabuğu (PK-S) elde edilmiştir.
- BDK'ların pirolizi: BDK atmosferik basınç altında sabit yataklı paslanmaz çelik reaktörde piroliz edilip ve piroliz katı ürünü elde edilmiştir.

- Liç ve adsorpsiyon: Piroliz katı ürünü, kral suyu (HNO_3 : HCl =3:1) ile karıştırılarak katı üründeki metallerin çözünmesi sağlanmıştır. Optimum şartlar altında PK-S ilavesiyle liç solüsyonundan adsorpsiyon ile bakır geri dönüşümü yapılmıştır. Örnekler ICP-OES’de analiz edilmiş ve bakır geri dönüşüm verimi %85,77 olarak belirlenmiştir.

5.1.2. Sistem sınırları

Sistem, BDK’ların geri dönüşüm tesisine gelmesi ile başlayıp bakır ürünün elde edilmesiyle sonlanmaktadır. Prosese giren besleme materyalinin eldesi, atıkların toplama merkezlerinden tesislere transferleri ve tesislere taşınması, BDK’ların geri dönüşüm tesislerindeki ayrıştırma işlemi ve elde edilen bakırın başka bir proseste kaynak olarak kullanılması sistem sınırlarına dahil edilmemiştir. Bu nedenle LCA, kapıdan kapıya yaklaşımı ile yapılmıştır. Sistem sınırları Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Sistem sınırları

5.1.3. Paylaştırma prosedürü

Peirce Smith geri dönüşüm yöntemi endüstriyel bir yöntem olduğundan proses boyunca besleme materyali olarak BDK haricinde konsantr bakır, AEEE gibi girdiler bulunmaktadır. Bu nedenle proses çıktısı olarak bakır haricinde kurşun, çinko, altın, gümüş, sülfürik asit, sıvı sülfür dioksit ve konsantr paladyum gibi yan ürünler oluşmaktadır. Tezin amacı yalnızca BDK’dan bakır eldesi olduğu için fiziksel paylaştırma prosedürü uygulanmıştır. Böylece proseste kullanılan yardımcı materyaller, enerji ve çıktılardaki emisyon yalnızca fonksiyonel birim olan 1 kg bakıra göre oranlanarak sisteme dahil edilmiştir.

Kayser geri dönüşüm yöntemi endüstriyel bir yöntem olduğundan proses boyunca besleme materyali olarak BDK haricinde konsantre bakır, AEEE gibi girdiler bulunmaktadır. Bu nedenle proses çıktısı olarak bakır, KRS oksit, demir silikat kumu gibi yan ürünler oluşmaktadır. Tezin amacı yalnızca BDK'dan bakır eldesi olduğu için fiziksel paylaşırma prosedürü uygulanmıştır. Böylece proseste kullanılan yardımcı materyaller, enerji ve çıktılardaki emisyon yalnızca fonksiyonel birim olan 1 kg bakıra göre oranlanarak sisteme dahil edilmiştir.

Pirolitik biometalürjik proses boyunca besleme materyali olarak BDK ile birlikte yardımcı materyaller kullanılmıştır. Proses çıktısı olarak bakır, piroliz ürünleri, çözelti gibi yan ürünler oluşmaktadır. Tezin amacı yalnızca BDK'dan bakır eldesi olduğu için fiziksel paylaşırma prosedürü uygulanmıştır. Böylece proseste kullanılan yardımcı materyaller ve enerji yalnızca fonksiyonel birim olan 1 kg bakıra göre oranlanarak sisteme dahil edilmiştir.

5.2. Envanter Analizi

Karşılaştırmada ele alınan Peirce Smith geri dönüşüm yöntemi, Kayser geri dönüşüm yöntemi ve pirolitik-biometalürjik geri dönüşüm yöntemlerine ait birincil veriler sırasıyla Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de gösterilmiştir. Peirce Smith geri dönüşüm yöntemine ait veriler İsveç-Rönnskar bölgesinde e-atıklardan bakır geri dönüşümü faaliyeti gösteren Boliden firmasının 2016 yılı faaliyet raporundan alınmıştır (http-3) (Tablo 5.1).

Kayser geri dönüşüm yöntemine ait veriler Aurubis firmanın geri dönüşüm teknolojileri departmanından alınmıştır (http-4) (Tablo 5.2).

Pirolitik-biometalürjik yöntemde ise Özkan vd. (2017)'nin yaptığı deneysel çalışmanın verileri esas alınmıştır (Tablo 5.3).

Geri dönüşüm yöntemleri için kullanılan ikincil veriler SimaPro 8.5 yazılımında bulunan Ecoinvent v2.2 ve v3.0 veri tabanından alınmıştır (http-5).

Tablo 5.1. Peirce Smith geri dönüşüm yöntemine ait birincil veriler (http-3)

Girdiler	Miktar
BDK	5,55 kg
Elektrik	30,40 kWh
Su	680,95 L

Tablo 5.2.(Devam). Peirce Smith geri dönüşüm yöntemine ait birincil veriler (http-3)

Çıktılar	Miktar
Bakır levha	1 kg
Kurşun	0,140 kg
Çinko klinkeri	0,159 kg
Altın	0,000 kg
Gümüş	0,002 kg
Sülfürik asit	2,430 kg
Sıvı sülfür dioksit	0,217 kg
Konsantre paladyum	0,0000145 kg
Metal emisyonu (havaya)	0,0000754 kg
SO ₂ emisyonu	0,005229 kg
CO ₂ emisyonu	0,05117418 kg
Metal emisyonu (suya)	0,00000822 kg
Azot emisyonu (suya)	0,0000328 kg

Tablo 5.2. Kayser geri dönüşüm yöntemine ait birincil veriler (http-4)

Girdiler	Miktar
BDK	5,5896 kg
Oksijen	0,22265 m ³
Nehir kumu	0,0725 kg
Kireç taşı	0,0255 kg
Elektrik	0,8659 kWh
Doğalgaz	2,182 kWh
Su	0,0039 L
Çıktılar	Miktar
Bakır levha	1 kg
KRS oxide	0,1 kg
Demir silikat kumu	0,7 kg
Diğerleri (kalay bileşikleri, nikel sülfat, vs.)	0,1 kg
Atıklar	3,7621 kg
CO ₂ emisyonu	0,00000228 kg
SO ₂ emisyonu	0,01155 kg
NO ₂ emisyonu	0,00000456 kg
Partikül madde	0,0000031 kg

Tablo 5.3. Piroolitik-biometalürjik geri dönüşüm yöntemine ait birincil veriler (Özkan vd., 2017)

Girdiler	Miktar
Atık portakal kabuğu	132 kg
Saf su	9.132 L
Elektrik	159.046 kWh
NaOH	5,30 kg
Baskılı devre kartı	132,45 kg

Tablo 5.3. (Devam) Pirolitik-biometalürjik geri dönüşüm yöntemine ait birincil veriler (Özkan vd., 2017)

HNO ₃	750 kg
HCl	195,36 kg
Çıktılar	Miktar
Bakır	1 kg
Atık çözelti	9.132 L
Piroliz katı ürünü	90,65 kg
Atık piroliz sıvısı	25,39 L
Diğer piroliz atıkları	16,41 L

Peirce Smith geri dönüşüm yöntemi İsveç’de, Kayser geri dönüşüm yöntemi Almanya’da kullanılmaktadır. Pirolitik biometalürjik geri dönüşüm yöntemine ait deneysel çalışma ise Türkiye’de yapılmıştır. Bu ülkelerdeki elektrik enerjisi üretim kaynakları birbirinden farklıdır. Yöntemlerin eşit şartlarda karşılaştırılması amacıyla tüm yöntemlerin LCA’sında Türkiye’ye ait elektrik üretim verisi kullanılmıştır. Elektrik profil verileri, Günkaya vd. (2016)’nin çalışması esas alınarak ve 2019 yılı için Türkiye’nin elektrik üretim profilinin kaynaklara göre dağılım yüzdeleri (%31,87 hidroelektrik barajlı + akarsu, %28,78 doğal gaz, %22,46 kömür (taş kömürü, asfaltit, linyit, ithal kömür), %7,90 rüzgâr, %1,46 jeotermal (http-6)) kullanılarak oluşturulmuştur. Pirolitik biometalürjik yöntemine ait elektrik tüketimi laboratuvarında kullanılan cihazların güçlerine ve kullanım sürelerine bağlı olarak belirlenmiştir.

5.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

LCA hesaplamaları, lisanslı SimaPro 8.5 yazılımı kullanılarak CML IA Baseline metodu ile yapılmıştır. Değerlendirmede öncelikle CML IA Baseline metodunda bulunan tüm etki kategorileri EU 25+3 ve World 2000 normalizasyon yöntemleriyle değerlendirilmiş, normalizasyon sonucunda ele alınan proseslerde önemli olan etki kategorileri belirlenmiş ve detaylı incelemeler bu etki kategorilerinin karakterizasyon sonuçları açısından yapılmıştır.

5.4. Sonuçlar

LCA, element bazlı abiyotik kaynakların tükenmesi (ADPe) (kg Sb ed.), fosil yakıt bazlı abiyotik kaynakların tükenmesi (ADPff) (MJ), küresel ısınma potansiyeli (GWP100) (kg CO₂ ed.), ozon tabakasının incilmesi potansiyeli (ODP) (kg CFC-11 ed.), insanlara olan toksik etki potansiyeli (HTP) (kg 1,4-DB ed.), tatlı su ekotoksosite

potansiyeli (FAETP) (kg 1,4-DB ed.), deniz ortamına ekotoksosite potansiyeli (MAETP) (kg 1,4-DB ed.), karasal ekotoksosite potansiyeli (TETP) (kg 1,4-DB ed.), fotokimyasal oksidasyon potansiyeli (FOP) (kg C₂H₄ ed.), asidifikasyon potansiyeli (AP) (kg SO₂ ed.) ve ötrofikasyon potansiyeli (OP) (kg PO₄⁻⁻⁻ ed.) çevresel etki kategorileri açısından öncelikle EU 25+3 ve World 2000 normalizasyon yöntemleriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 5.4'de verilmiştir. Bu tabloya göre, en fazla potansiyele sahip etki kategorileri belirlenmiş ve kalın harflerle gösterilerek karakterizasyon bazında inceleme için seçilmiştir. Buna göre seçilen etki kategorilerinin karakterizasyon sonuçları Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.4. BDK' dan Cu geri dönüşüm yöntemlerinin farklı normalizasyon yöntemleriyle değerlendirilmesi

	EU25 + 3			WORLD 2000		
	PS	KRS	PB	PS	KRS	PB
ADP	2,00E-03	5,00E-01	2,40E-01	0,00E+00	1,30E-01	6,00E-02
ADPff	9,03E+00	1,15E+01	9,03E+00	7,65E+00	9,89E+00	7,53E+00
GWP100a	5,95E+00	5,79E+00	6,03E+00	6,80E+00	6,75E+00	6,78E+00
ODP	3,70E-02	2,50E-01	4,00E-02	1,50E-02	1,00E-01	2,00E-02
HTP	4,38E+00	3,02E+00	4,50E+00	7,80E+00	5,48E+00	7,90E+00
FAETP	1,17E+00	5,90E-01	1,16E+00	9,50E-01	4,90E-01	9,30E-01
MAETP	2,30E+01	2,09E+01	2,38E+01	4,83E+01	4,50E+01	4,93E+01
TETP	1,00E-02	1,20E-01	2,00E-02	1,00E-02	1,20E-01	2,00E-02
FOP	3,95E+01	2,76E+01	3,89E+01	1,71E+01	1,22E+01	1,65E+01
AP	1,59E+01	2,92E+01	1,53E+01	1,03E+01	1,93E+01	9,73E+00
OP	1,04E+00	5,80E-01	1,08E+00	1,12E+00	6,40E-01	1,14E+00

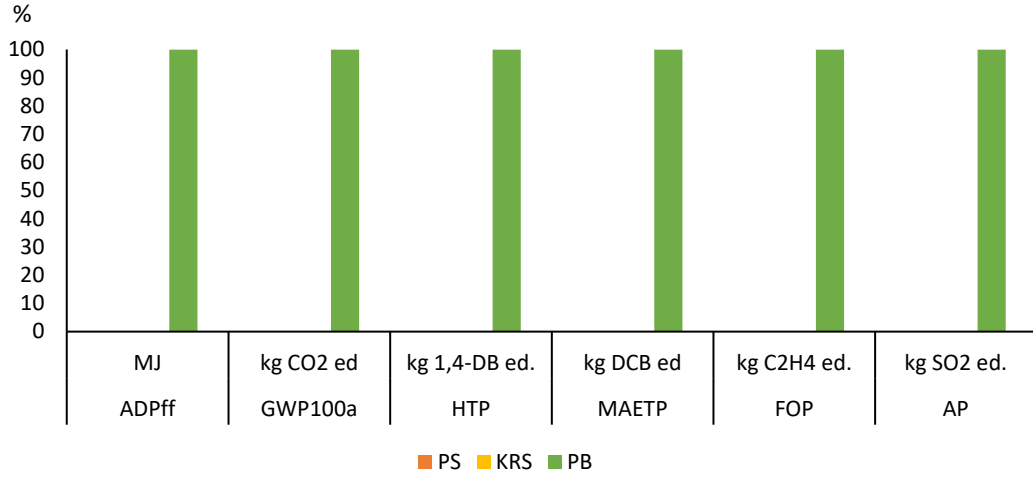
PS: Peirce Smith geri dönüşüm yöntemi, KRS: Kayser geri dönüşüm yöntemi, PB: Pirolitik biometalürjik geri dönüşüm yöntemi, ADP: abiyotik kaynakların tükenmesi, ADPff: fosil yakıt bazlı abiyotik kaynakların tükenmesi, GWP100: küresel ısınma potansiyeli, ODP: ozon tabakasının incilmesi potansiyeli, HTP: insanlara olan toksik etki potansiyeli, FAETP: tatlı su ekotoksosite potansiyeli, MAETP: deniz ortamına ekotoksosite potansiyeli, TETP: karasal ekotoksosite potansiyeli, FOP: fotokimyasal oksidasyon potansiyeli, AP: asidifikasyon potansiyeli, OP: ötrofikasyon potansiyeli

Tablo 5.5. BDK'dan bakır geri dönüşüm yöntemlerinin karakterizasyon sonuçları

Etki kategorisi	Birim	Yöntemler		
		PS	KRS	PB
ADPff	MJ	2,02E+02	1,57E+01	1,07E+06
GWP100a	kg CO ₂ ed.	1,97E+01	1,18E+00	1,06E+05
HTP	kg 1,4-DB ed.	1,39E+00	5,88E-02	7,60E+03
MAETP	kg 1,4-DB ed.	6,50E+02	3,63E+01	3,57E+06
FOP	kg C ₂ H ₄ ed.	4,36E-02	1,86E-03	2,27E+02
AP	kg SO ₂ ed.	1,70E-01	1,91E-02	8,66E+02

PS: Peirce Smith geri dönüşüm yöntemi, KRS: Kayser geri dönüşüm yöntemi, PB: Pirolitik biometalürjik geri dönüşüm yöntemi, ADPff: fosil yakıt bazlı abiyotik kaynakların tükenmesi, GWP100: küresel ısınma potansiyeli, HTP: insanlara olan toksik etki potansiyeli, MAETP: deniz ortamına ekotoksosite potansiyeli, FOP: fotokimyasal oksidasyon potansiyeli, AP: asidifikasyon potansiyeli

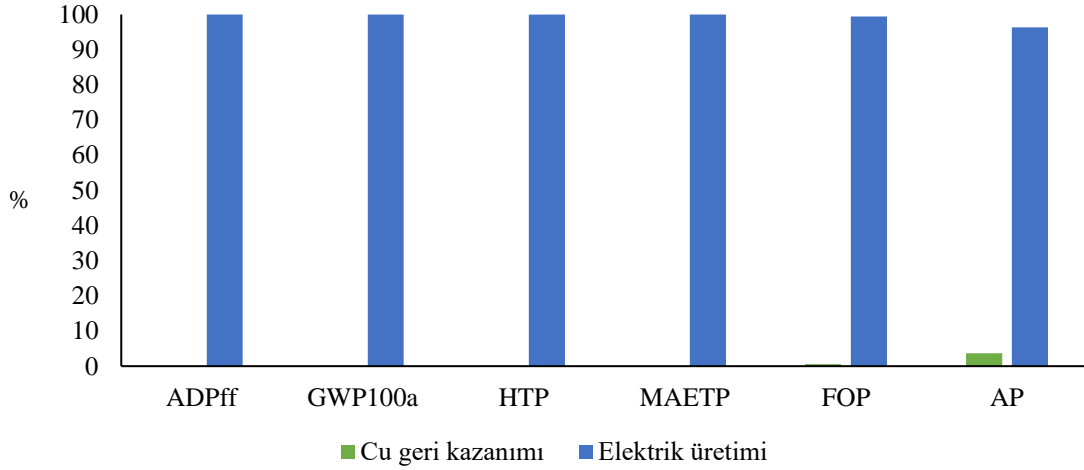
Karakterizasyon sonuçlarının BDK'dan bakır geri dönüşüm yöntemlerine göre dağılımları ise Şekil 5.9'da verilmiştir. Buna göre pirolitik biometalürjik yöntem tüm çevresel etki kategorilerinde diğer yöntemlere göre %99 oranının üzerinde etkiye sahiptir. Çevresel etki kategorilerine en az katkı yapan bakır geri dönüşüm yönteminin Kayser geri dönüşüm yöntemi olduğu görülmüştür.



Şekil 5.9. Atık BDK'dan Cu geri kazanım yöntemlerinin karakterizasyon sonuçlarının etki kategorilerine göre yüzde dağılımı

Peirce Smith geri dönüşüm yönteminde kullanılan proseslerin neden olduğu çevresel etkilerin yüzde dağılımları Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Buna göre en fazla değere sahip olan ADPff kategorisindeki etkinin tamamına proses için gerekli olan elektrik üretimi prosesinde kömür kullanılması (%82) sebep olmaktadır. GWP100a kategorisindeki etkinin büyük bir kısmına (%99,96) elektrik üretim prosesi boyunca karbondioksit emisyonu (%70,96) neden olmaktadır. HTP kategorisindeki etkiye elektrik üretim prosesi (%99,96) boyunca selenyum (%28,84) deşarjı neden olmaktadır. MAETP kategorisindeki etkinin tamamına (%100) elektrik üretimi prosesi boyunca selenyum (%27,95) deşarjı neden olmaktadır. Elektrik üretim prosesinde selenyumun katkı yapmasının nedeni fosil kaynakların tüketilmesi boyunca özellikle kömür kullanılması sonucunda büyük miktarda selenyum açığa çıkmasıdır. Kömürdeki selenyum miktarı 0,13-4,30 mg/kg arasındadır (Pilarczyk, vd, 2019). Elektrik üretim prosesinde arka plan verisi olarak kömürün elde edilmesi, işlenmesi, taşınması ve yanması aşamaları bulunmaktadır. Kömürün yanması aşamasında selenyum açığa çıkmaktadır (Badea, vd., 2010). FOP kategorisindeki katkıya elektrik üretim prosesi (%99,42) boyunca

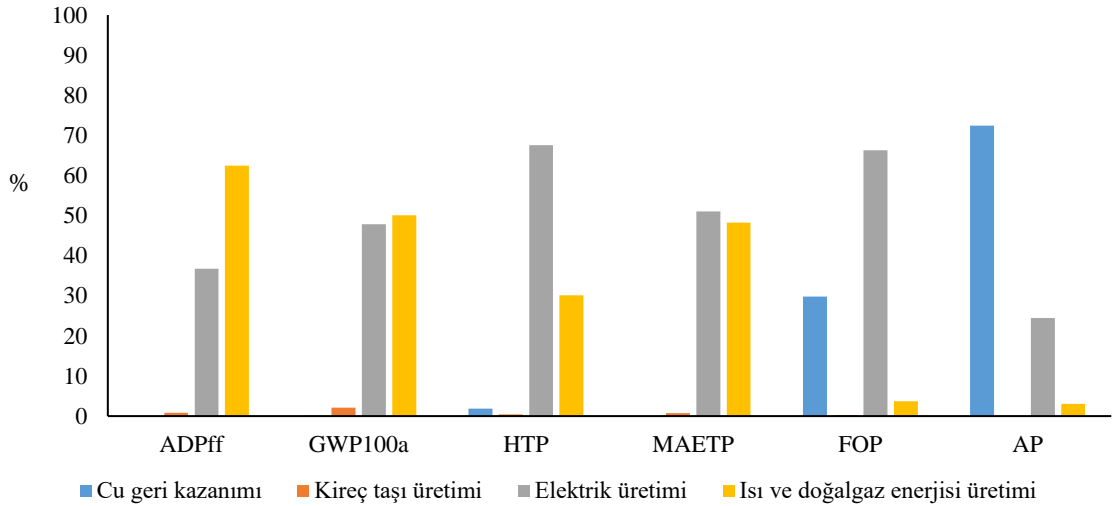
karbonmonoksit (%87,24) emisyonu neden olmaktadır. AP kategorisindeki katkıya elektrik üretim prosesi (%96,31) boyunca sülfür dioksit (%77,12) emisyonu oluşumu neden olmaktadır.



Şekil 5.10. Peirce Smith geri dönüşüm yöntemindeki proseslerin etki kategorilerine göre yüzde dağılımı

Kayser geri dönüşüm yönteminde kullanılan proseslerin neden olduğu çevresel etkilerin yüzde dağılımları Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Buna göre en fazla değere sahip olan ADPff kategorisindeki etkiye en fazla proses için gerekli olan enerjinin üretiminde (%62,45) doğal gaz kullanılması (%96,58) sebep olmaktadır. GWP100a kategorisindeki etkiye enerji üretimi (%50,06) sırasında karbondioksit emisyonu (%83,04) oluşması ve elektrik üretim prosesi boyunca karbondioksit emisyonu (%70,96) neden olmaktadır. HTP kategorisindeki etkiye elektrik üretim prosesi (%67,53) boyunca selenyum (%28,84) deşarjı neden olmaktadır. MAETP kategorisindeki etkiye elektrik üretimi prosesi (%51,03) boyunca selenyum (%27,95) deşarjı ve enerji üretimi için (%48,22) hidrojen florid (%84,24) emisyonu neden olmaktadır. Elektrik üretim prosesinde selenyumun etki göstermesinin nedeni elektrik üretiminde kaynak olarak kullanılan kömüre ait zenginleştirme faktörünün selenyum için 65’i geçmesi ve bu değer en yüksek iz elementler arasında yer almasıdır (Lemly, 2004). FOP kategorisindeki katkıya elektrik üretim prosesi (%66,28) boyunca karbonmonoksit (%87,24) emisyonu neden olmaktadır. AP kategorisindeki katkıya Kayser geri dönüşüm prosesi (%72,41) boyunca sülfür dioksit (%99,98) emisyonu oluşumu neden olmaktadır. Kayser geri dönüşüm yönteminde

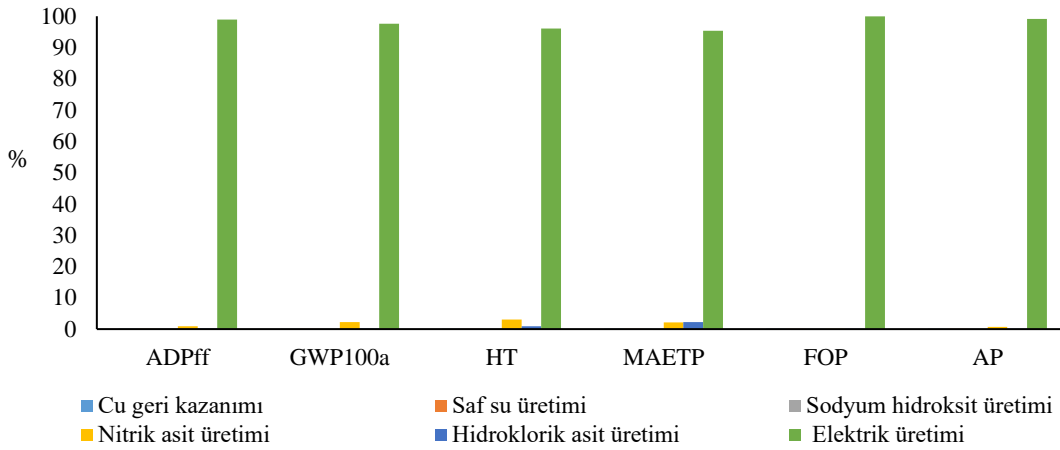
kullanılan fırının üstünde bulunan banyo bölgesinde organik maddeler tamamen yanar bu da tesise ait emisyonların düşük seviyede olmasını sağlar. Bu nedenle çevresel etki kategorilerinin birçoğundan alınan sonuç diğer endüstriyel yöntemdekilere göre daha düşüktür. Bakır eriyiğini oksijensizleştirme işlemi için doğal gaz kullanılması sebebiyle çevresel etki kategorilerindeki katkının çoğunluğuna neden olmaktadır.



Şekil 5.11. Kayser geri dönüşüm yöntemindeki proseslerin etki kategorilerine göre yüzde dağılımı

Pirolitik biometalürjik geri dönüşüm yönteminde kullanılan proseslerin neden olduğu çevresel etkilerin yüzde dağılımları Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Buna göre ADPff kategorisindeki etkiye en fazla proses için gerekli olan elektrik üretim prosesinde (%98,89) kömür kullanılması (%82,90) sebep olmaktadır. GWP100a kategorisindeki etkiye elektrik üretim prosesi (%97,58) boyunca karbondioksit emisyonu (%70,96) oluşması neden olmaktadır. HTP kategorisindeki etkiye elektrik üretim prosesi (%96,02) boyunca selenyum (%28,84) deşarjı neden olmaktadır. MAETP kategorisindeki etkiye elektrik üretimi prosesi (%95,36) boyunca selenyum (%27,95) ve molibden (%23,44) deşarjı ve hidrojen florür emisyonu (%19,50) neden olmaktadır. Selenyum, molibden ve hidrojen florür emisyonlarına termik santrallerde kömür külünün bertaraf edilmesi ve kömür madenciliğindeki süreçler neden olmaktadır (Günkaya, vd., 2016). Kömürün yanması ile selenyum açığa çıkmaktadır (Badea, vd., 2010). FOP kategorisindeki katkıya elektrik üretim prosesi (%99,94) boyunca karbonmonoksit (%87,24) emisyonu neden olmaktadır. AP kategorisindeki katkıya elektrik üretim prosesi (%99,14) boyunca kükürt dioksit (%77,12) ve nitrojen oksit (%11,89) emisyonları oluşumu neden olmaktadır.

Pirolitik biometalürjik yöntemde tüm çevresel etki kategorilerine elektrik üretim prosesinin en fazla katkı yapan proses olduğu görülmektedir. Bu yöntem deneysel bir çalışma olup endüstriyel boyutta modellenmesi yapılmadığından çalışmada kullanılan veriler laboratuvar ölçeklidir. Bu nedenle elektrik tüketim verileri diğer yöntemlere göre yüksektir. Yöntemde kullanılan makine ve ekipmanlar endüstriyel olarak tasarlandığında sonuçlar farklılık gösterebilecektir. Bu yöntemde kullanılan BDK'ların üzerindeki kıymetli metal içeren materyallerin sökülmesi geri dönüştürülecek bakır miktarının azalmasına neden olmuştur. BDK'nın yalnızca levha kısmı ile piroliz işlemleri yapılmıştır. Bu nedenle kullanılan BDK miktarı diğer yöntemlere göre yüksektir. Bu yöntemde kullanılan yardımcı materyal miktarının da artmasına neden olmaktadır. Yöntemde kullanılan materyallerin miktarındaki bu artış çevresel etki kategorilerinin sonuçlarını etkilemektedir.



Şekil 5.12. Pirolitik biometalürjik geri dönüşüm yöntemindeki proseslerin etki kategorilerine göre yüzde dağılımı

Pirolitik biometalürjik yöntemde atık çözelti doğrudan alıcı ortama deşarj edilmediğinden atıksu deşarj parametrelerine ve endüstriyel yöntemlerin suya verdiği deşarj yüklerine ulaşma seviyesine kadar tekrar kullanabileceği kabul edilmiştir. Buna göre pirolitik biometalürjik yöntemde hazırlanan çözelti 4.167 kez kullanabilecektir. Fonksiyonel birim 1 kg bakır olduğundan hazırlanan çözelti ile 4.167 kg bakır geri dönüştürülebileceği düşünülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Teknolojinin hızla ilerleyişi, alım gücünün artışı, tüketim odaklı bir büyümenin ortaya çıkmasıyla oluşan atık miktarları da artış göstermektedir. Doğal kaynak rezervlerinin tükenmesini azaltmak için atıkların geri dönüşüme kazandırılması konusunda toplumları bilinçlendirme çalışmaları yapılmalıdır. Ülkemizde uzun yıllardır ekonomik açıdan fayda sağlamak amacıyla metal atıklarının geri dönüşümü yaygın olarak yapılmaktadır. Oldukça fazla değerli metal içeriğine sahip olan elektronik atıkların toplanması ve işlenmesi için çeşitli kurum ve kuruluşlar eğitimler ve teşvikler verip atık toplama merkezleri kurmaktadır. Böylece tüm kategorilerdeki atıkların geri dönüşümü sağlanıp düzenli ve düzensiz depolamadan kaynaklanan çevresel etkiler azalacak, kaynak tüketimi azaltılacak ve ekonomik açıdan kazanç sağlanacaktır.

Atık baskılı devre kartlarından bakır geri dönüşümü için kullanılan endüstriyel ve deneysel yöntemlerin çevresel etkilerini belirlemek için yapılan bu çalışmada, Almanya Lünen’de bulunan Aurubis firmasında kullanılan Kayser geri dönüşüm yönteminin en az çevresel etkiye neden olduğu ve diğer yöntemlere göre çevre dostu bir yöntem olduğu görülmüştür. Kayser geri dönüşüm yönteminde kullanılan fırının Peirce Smith dönüştürücünün geliştirilmesiyle ortaya çıktığı bilinmektedir. Buna göre geri dönüşüm teknolojisinin ilerlemesiyle atıkların geri dönüşümü artırılırken çevresel etkilerin de giderek azalacağı görülmektedir. Deneysel yöntem olan pirolitik biometalurjik geri dönüşüm yönteminin geliştirilmesi durumunda çevresel etkilerin azaltılmasıyla beraber yardımcı materyal olan portakal kabuğunun biyosorbent olarak kullanılmasıyla endüstriyel simbiyoz da sağlanabilecektir.

Sonuç olarak LCA yöntemi kullanılarak baskılı devre kartlarından bakır geri dönüşüm yöntemlerinin çevresel etkileri karşılaştırılabilmiş, en tercih edilebilir yöntem belirlenmiş ve tezde hedeflenen amaca ulaşılmıştır.

KAYNAKÇA

- Badea, A. A., Voda, I. ve Dinca, C. F. (2010). Comparative analysis of coal, natural gas and nuclear fuel life cycles by chains of electrical energy production. *Natural gas*, 9(25.3), 9-5.
- Cui, H., ve Anderson, C. G. (2016). Literature review of hydrometallurgical recycling of printed circuit boards (PCBs). *Journal of Advanced Chemical Engineering*, 6(1), 1-11.
- Dascalescu, L., Dragan, C., Bilici, M., Beleca, R., Hemery, Y., Rouau, X. (2008). Premises for the electrostatic separation of wheat bran tissues. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1-6. IEEE.
- Duflou, J. R., Peeters, J. R., Altamirano, D., Bracquene, E., Dewulf, W. (2018). Demanufacturing photovoltaic panels: comparison of end-of-life treatment strategies for improved resource recovery. *CIRP Annals*, 67(1), 29-32.
- Fiore, S., Ibanescu, D., Teodosiu, C., Ronco, A. (2019). Improving waste electric and electronic equipment management at full-scale by using material flow analysis and life cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 928-939.
- Ghodrat, M., Rhamdhani, M. A., Brooks, G., Rashidi, M., Samali, B. (2017). A thermodynamic-based life cycle assessment of precious metal recycling out of waste printed circuit board through secondary copper smelting. *Environmental Development*, 24, 36-49.
- Gonda, L., ve Degrez, M. (2018). End-of-life management of computers in Brussels: environmental comparison of two treatment chains. *Procedia CIRP* 69, 968-973.
- Gu, F., Zhang, W., Guo, J., Hall, P. (2019). Exploring “Internet+Recycling”: Mass balance and life cycle assessment of a waste management system associated with a mobile application. *Science of the Total Environment*, 649, 172-185.
- Günkaya, Z., ve Banar, M. (2016). An environmental comparison of biocomposite film based on orange peel-derived pectin jelly-corn starch and LDPE film: LCA and biodegradability. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 469.

- Günkaya, Z., Özdemir, A., Özkan, A., Banar, M. (2016). Environmental performance of electricity generation based on resources: a life cycle assessment case study in Turkey. *Sustainability*, 8(11), 1097.
- Hadi, P., Xu, M., Lin, C. S., Hui, C. W., McKay, G. (2015). Waste printed circuit board recycling techniques and product utilization. *Journal of hazardous materials*, 283, 234-243.
- Harikrushnan, B., Shreyass, G., Hemant, G., Pandimadevi, M. (2016). Recovery of metals from printed circuit boards (pcbs) using a combination of hydrometallurgical and biometallurgical processes. *International Journal of Environmental Research*, 10(4), 511-518.
- Hong, J., Shi, W., Wang, Y., Chen, W., Li, X. (2015). Life cycle assessment of electronic waste treatment. *Waste Management*, 38, 357-365.
- http-1: <http://www.kuark.org/2013/10/bakir-uretimi/> (Erişim tarihi: 14.04.2019)
- http-2: http://mme.deu.edu.tr/wp-content/uploads/2017/10/Izabe_Ergitme.pdf (Erişim tarihi: 17.04.2019)
- http-3: <http://reports.boliden.com/globalassets/gri2016/pdfs/boliden-annual-report-2016.pdf> (Erişim tarihi: 23.10.2018)
- http-4: <https://www.aurubis.com/products/recycling/technology> (Erişim tarihi: 11.10.2018)
- http-5: <https://www.ecoinvent.org/> (Erişim tarihi: 15.06.2019)
- http-6: <https://www.tespam.org/turkiye-elektrik-enerjisi-uretim-kaynaklari/> (Erişim tarihi: 13.05.2019)
- http-7: <https://www.britannica.com/technology/matte-smelting> (Erişim tarihi: 17.04.2019)
- Iannicelli-Zubiani, E. M., Giani, M. I., Recanati, F., Dotelli, G., Puricelli, S., Cristiani, C. (2017). Environmental impacts of a hydrometallurgical process for electronic waste treatment: a life cycle assessment case study. *Journal of cleaner production*, 140, 1204-1216.

- ISO, T. 14040, 2007. Çevre Yönetimi–Hayat Boyu Değerlendirme–İlkeler ve Çerçeve. *Türk Standartları Enstitüsü*.
- Kiddee, P., Naidu, R. ve Wong, M. H. (2013). Electronic waste management approaches: An overview. *Waste management*, 33(5), 1237-1250.
- Lemly, A. D. (2004). Aquatic selenium pollution is a global environmental safety issue. *Ecotoxicology and environmental safety*, 59(1), 44-56.
- Lennartsson, A. (2013). *Development of a process model for a Peirce-Smith converter* (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).
- Lennartsson, A., Engström, F., Samuelsson, C., Björkman, B., Pettersson, J. (2018). Large-scale WEEE recycling integrated in an ore-based Cu-extraction system. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4(2), 222-232.
- Li, J., Lu, H., Guo, J., Xu, Z., Zhou, Y. (2007). Recycle technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards. *Environmental science & technology*, 41(6), 1995-2000.
- Matthews, S., Hendrickson, C., & Matthews, D. (2014). *Life Cycle Assessment Quantitative Approaches for Decisions That Matter*. <https://www.lcatextbook.com/>
- Maxfield, C. (2008). Printed Circuit Boards (PCBs). *Bebop to the Boolean boogie: an unconventional guide to electronics* içinde (s. 251). Newnes.
- Mulenshi, J. (2015). Mapping of settling processes at Boliden Rönnskär and Harjavalta Smelters.
- Muralikrishna, I. V. ve Manickam, V. (2017). Chapter Five-Life Cycle Assessment. *Environ Manage*, 57-75.
- Ning, C., Lin, C. S. K., Hui, D. C. W., McKay, G. (2017). Waste printed circuit board (PCB) recycling techniques. *Chemistry and Chemical Technologies in Waste Valorization* (21-56). Springer, Cham.
- Osmanbaşoğlu, M., Özkan, A., Günkaya, Z., Banar, M. (2019). Application of Analytic Network Process (ANP) and PROMETHEE for different treatment/disposal technologies of persistent organic pollutants (POPs). *Environmental Research and Technology*, 2(1), 19-25.

- Özkan, A., Günkaya, Z., Yapıcı, E., Banar, M. (2017). Adsorption of copper from waste printed circuit boards with modified orange peels. *BioResources*, 12(4), 7283-7300.
- Özkan, A., Cebeci Topbaş, K., Günkaya, Z., Yapıcı, E., Akgün, H., Banar, M. (2018). Waste plastic type selection to produce carbon nanotube by using ELECTRE III methodology. Bergamo: CISA.
- Özkan, A., Yapıcı, E., Günkaya, Z., Banar, M. (2018). Atık portakal kabuklarıyla baskılı devre kartlarından paladyum adsorpsiyonu. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 201-206.
- Özkan, A., Günkaya, Z., Özdemir, A., Banar, M. (2018). Sanayide temiz üretim ve döngüsel ekonomiye geçişte endüstriyel simbiyoz yaklaşımı: bir değerlendirme. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi-B Teorik Bilimler*, 6(1), 84-97.
- Peters, G. ve Svanström, M. (2019). *Environmental Sustainability for Engineers and Applied Scientists*. Cambridge University Press.
- Rao, M., Sultana, R. ve Kota, S. H. (2016). Electronic waste. *Solid and Hazardous Waste Management* içinde (s. 209).
- Scientific Applications International Corporation (SAIC) ve Curran, M. A. (2006). *Life-cycle assessment: principles and practice* (1-80). Cincinnati, Ohio: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Tansel, B. (2016). From electronic consumer products to e-wastes: Global outlook, waste quantities, recycling challenges. *Environment International*, 33-45.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2017). Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi sonuçları. Ankara
- Xu, Z., Guo, J., Lu, H., Zhou, Y., Li, J. (2007). Recycle technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards. *Environmental Science and Technology*, 1995-2000.
- Yu, L., Moriguchi, Y., Nakatani, J., Zhang, Q., Li, F., He, W., Li, G. (2019). Environmental impact assessment on the recycling of waste LCD panels. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1-28.

Rodriguez-Garcia, G., ve Weil, M. (2016). Life cycle Assessment in WEEE Recycling.
WEEE Recycling (pp. 177-207).



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Cansu DUMAN

Yabancı Dil: İngilizce

Doğum Yeri ve Yılı: Eskişehir/1992

E-posta: cansu_duman@eskisehir.edu.tr

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2014, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
- 2016, Anadolu Üniversitesi, Açıköğretim Fakültesi, İşletme Bölümü
- 2015-, Çevre Mühendisi, Sahalar Metal Demir Çelik Ltd. Şti