

## Klasik madencilikten kent madenciliğine: E-atıklardan metallerin kazanımı

Devrim PEKDEMİR<sup>1</sup>

### Öz

Dünya’da bir yılda 50 milyon tondan fazla e-atık üretilmektedir. E-atıkların geri dönüşümü yapılmazsa büyük bir çevre sorunu oluştururlar. E-atıkların parasal karşılığı tahmini olarak 55 milyar Avro’dur. Türkiye’de son 10 yılda yaklaşık 150 milyon adet mobil telefon ithal edilmiştir. Diğer elektrikli ve elektronik eşyaları da eklediğimizde önemli miktarda e-atık potansiyeli ortaya çıkmaktadır. Genellikle ithalat yoluyla Türkiye’ye giren nadir yer elementleri ve değerli metallerin ithalatının azaltılması için e-atık geri dönüşümü kritik önem taşımaktadır. Son yıllarda pirometalürjik yöntemlere göre çevre duyarlılığı daha iyi olan hidrometalürjik yöntemler ile ilgili çalışmaların sayısı artmıştır. Bu çalışmada e-atık tanımı, sınıflandırılması, içerikleri ve ortaya çıkan e-atık miktarları ile ilgili bilgilerin ve geri dönüşümde kullanılan yöntemler hakkında yapılan çalışmaların derlemesi yapılmıştır.

### 1. Giriş

İnsanlar günlük gereksinimlerini karşılamak için gün geçtikçe artan miktarlarda elektrikli ve elektronik cihaz (EEC) kullanmaktadır. Cihazların eskimesinin yanında daha küçük, hızlı ve güncel cihazlara duyulan doyumsuz istek EEC’lerin tüketimini arttırmaktadır. Teknoloji bağımlılığı ve toplum üzerinde etkili olan tüketime yönelik propaganda büyük miktarlarda EEC kullanımına yol açmaktadır. Tüketim arttıkça devasa atık elektrikli ve elektronik cihazlar (AEEC veya E-atık) oluşmaktadır. Atık sınıflandırmasında katı atıklar içinde yer alan e-atıklar giderek ayrı bir kategori haline gelmektedir.

EEC’ler yaklaşık 1000 farklı bileşik içeren ürünlerdir (Cayumil vd., 2016). Bu bileşiklerin bir kısmının zehirli olmasından dolayı e-atıklar insan ve çevre açısından önemli bir risk oluşturmaktadır. Ancak içerdikleri değerli metaller, demir ve alüminyum gibi daha az değerli metaller ve plastik bileşenlerinin geri kazanılması e-atıkları değerlendirilebilir bir potansiyel haline getirmektedir. Özellikle tükenmekte olan metal rezervleri (bakır vb.) için önemli bir seçenek olmaktadır. Ayrıca içerdikleri soy metaller ve nadir yer elementleri nedeniyle metal madenciliğinin yönünü klasik madencilikten şehir madenciliğine doğru çevirebileceklerdir.

### 2. Kent Madenciliği

Maden tanımı genişletilerek insan yararına kullanılabilir tüm kaynaklar olarak tanımlandığında malzeme geri dönüşümü ve kent madenciliği eş anlamlı olur. Bu kapsamda değerlendirildiğinde kent madenciliği atıklardan sadece metal kazanımı ile sınırlandırılmaz. Böylece insan gereksinimlerinin oluşturduğu tüm üretim yöntemlerinin ve tüketim alışkanlıklarının ortaya çıkardığı atıklar kent madenciliğinin kapsamına girmektedir. Bina ve alt yapı ile ilgili tüm çalışmalar (inşa, yeniden inşa, yıkım) sırasında oluşan atıklar, üretim donanımlarının kullanım ömrünü doldurması sonucu ortaya çıkan atıklar, son tüketicinin kullandığı tüm ürünlerin kullanımını sonrası oluşan atıklardan hammadde geri kazanım işlemleri kent madenciliği kapsamına girmektedir. Ancak e-atıkların içerikleri ve yıllar içindeki miktar artışı göz önüne alındığında kent madenciliğinin önemli bir girdisi olarak teknik fizibilitesinin yapılarak potansiyelinin belirlenmesi acil ve önemlidir (Zuo vd., 2019). Yüksek teknoloji cihazlarının üretiminde kullanılan metaller için önemli bir ikincil hammadde kaynağıdır. Aynı zamanda bu atıklardan metal kazanımı için klasik üretim yöntemlerine göre daha az teknolojik yatırım gerekir (Sun vd., 2016). Kent madenciliği ile metal kazanımı birincil hammaddeler üzerindeki tüketim baskısını azaltarak boşa gidecek değerli hammaddelerin yeniden kullanımını sağlar. Geri dönüşüm ile e-atık miktarında ve klasik metal madenciliği faaliyetlerindeki azalma çevre üzerindeki olumsuz etki ve risklerin ortadan kalkmasını sağlamaktadır.

### 3. AEEC veya E-Atıkların Tanımı

Telefonlar, tabletler, masaüstü ve dizüstü bilgisayarlar, buzdolapları, çamaşır ve bulaşık makineleri, sensörler, TV’ler (CRT, LCD, PDP), medikal cihazlar, aydınlatma cihazları, küçük ev aletleri ve elektrikli aletler, oyuncaklar, eğlence donanımları, spor malzemelerini içine alan tüketici elektroniği gibi elektrikli ve elektronik cihazlar günlük kullanımda her an karşılaştığımız cihazlardır. Bunların yanı sıra sanayide kullanılan motorlar, CNC tornalar, robotik makineler, enerji üretiminde kullanılan türbinler, rüzgâr türbinleri, güneş panelleri gibi büyük ve günlük olarak karşılaşmadığımız cihazlardır. Tüm bu cihazların kullanım ömürlerini doldurması, bozulması veya yenisiyle değiştirilmesi nedeniyle artık kullanılmaması sonucu e-atıklar oluşmaktadır (Ilankoon vd., 2018).

<sup>1</sup> Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığı, Ankara

Avrupa Birliği'nin 2002/96/EC sayılı yönergesinde e-atık tanımı şöyledir: Sahibi tarafından yürürlükteki ulusal yasa hükümlerine göre tamamen veya bir kısmı elde çıkarılan veya atılan elektrikli ve elektronik cihazlara denir (Anonim, 2019a).

Tehlikeli atıkların sınır ötesi taşınması ve bertaraf edilmesinin kontrolüne ilişkin Basel Sözleşmesi'ne göre buzdolabı, klima gibi büyük ev eşyalarından bilgisayar, cep telefonu, müzik çalar gibi tüketici elektroniğine kadar geniş bir aralıktaki elektrik kullanan ürünlerin kullanıcısı tarafından atılması sonucu oluşan atıklara e-atık denir. Cıva, kurşun ve bromlu alev geciktiriciler gibi zehir maddeler içermesinden dolayı tehlikeli atık sınıfında değerlendirilmiştir (Anonim, 2019b).

Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) e-atığı, ömrünün sonuna ulaşmış bir elektrik güç kaynağı kullanan herhangi bir cihaz olarak tanımlarken, genişletilmiş üretici sorumluluğu kavramının e-atık yönetiminde uygulanması konusunda bir strateji bildirmiştir. Bu atık yönetimi alanında, genişletilmiş üretici sorumluluğu, ürün yaşam döngüsü boyunca bir ürünle ilişkili tüm çevresel maliyetleri, söz konusu ürünün piyasa fiyatına eklemek için bir stratejidir. Genişletilmiş üretici sorumluluk mevzuatı, yeniden üretim girişimlerinin benimsenmesinin arkasındaki itici güçtür (Anonim, 2019c).

E-atık sorununu çözme girişimi (Solving the E-waste Problem-StEP Initiative) e-atıkları sadece tüketici elektroniği ile sınırlandırmayıp kapsamı genişletmiş böylece her tip elektrikli ve elektronik cihazı kapsam içine sokmuştur. Tanıma göre, sahibinin kullanma niyeti olmadan attığı bütün

veya parça her türlü elektrikli ve elektronik cihaz e-atık kapsamına girmektedir. Ayrıca elektrikli ve elektronik cihazların tanımını güç beslemeli veya batarya beslemeli, devreli veya elektrik bileşenli ev veya işyeri eşyaları olarak tanımlayarak kapsamın genişlemesini sağlamıştır (Anonim, 2019d).

### 3.1. Sınıflandırma

E-atıklar için sınıflandırmada farklı ana başlıklar belirlenmesine rağmen kapsamlar aynıdır. En genel sınıflandırmada e-atıklar altı kategoride toplanmıştır (Çizelge 1).

Avrupa Birliği'nin 2002/96/EC sayılı e-atıklar üzerine yönergesinde sınıflandırma başlıkları özelleştirilmiştir. Ancak kapsam bakımından bir değişiklik yoktur (Çizelge 2).

### 3.2. Genel Durum

Bir yılda dünyada yaklaşık 50 milyon ton e-atık ortaya çıkmakta olup bunun sadece %20'si uygun kanallarla geri dönüştürülebilmektedir (Şekil 1). Ortaya çıkan bu e-atık miktarı şimdiye kadar üretilen tüm ticari uçaklardan ve 4500 Eiffel kulesinin kütesinden büyüktür (Baldé vd., 2017). 40 tonluk (18 tekerli) 1.15 milyon kamyonu doldurmaya yetecek kadar atık ortaya çıkmıştır. Eğer bu atıklar bir hat üzerine uç uca dizildiğinde İstanbul-Londra arası mesafenin 8 katı uzunluğa sahip olacaktır.

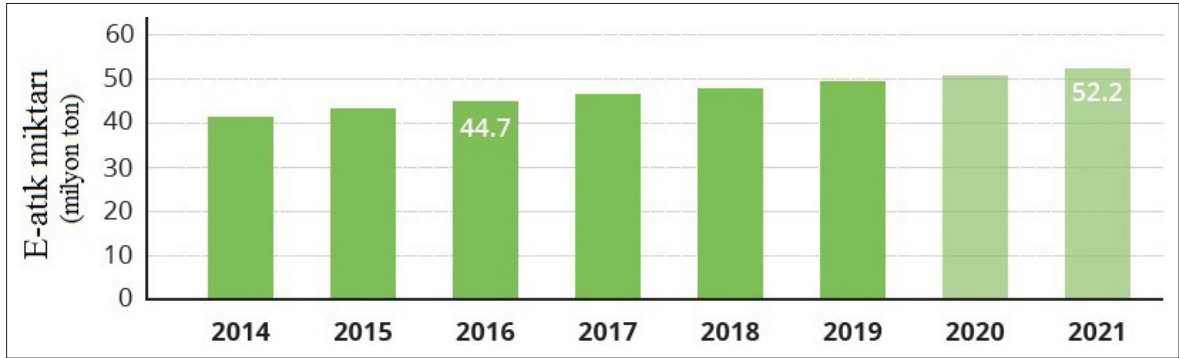
E-atıkların tahmin edilen değeri 55 milyar Avro'dur. Ancak günümüz koşullarında (teknik, ekonomik vb.) e-atıkların içindeki değerli ve yarı değerli metallerin tamamını almak mümkün görünmemektedir. Ancak yakın bir gelecekte klasik

Çizelge 1- E-atıkların sınıflandırılması (Doan vd., 2019).

Sınıf	Örnek	Toplam E-Atık'taki Payı (%)
Küçük Cihazlar	Elektrikli süpürgeler, her türlü fırınlar, saç kurutma makineleri, traş makineleri, hesap makineleri, radyolar, müzik setleri, elektrikli ve elektronik oyuncaklar, küçük tıbbi donanımlar, her türlü küçük ekranlar ve kontrol donanımları	30
Büyük Cihazlar	Çamaşır makineleri, kurutucular, bulaşık makineleri, elektrikli sobalar, büyük yazıcı ve kopyalama makineleri ve fotovoltaik paneller	28
Sıcaklık Değiştirici Cihazlar	Buzdolapları, dondurucular, klimalar ve ısı pompalarını içeren ısıtma ve soğutma donanımları	17
Ekran ve Monitörler	Monitörler, televizyonlar, dizüstü bilgisayarlar, tabletler	15
BT ve İletişim Cihazları	Cep telefonları, GPS'ler, yönlendiriciler, kişisel bilgisayarlar, yazıcılar, telefonlar	7
Lambalar	Flüoresans lambalar, yüksek enerjili lambalar, LED lambalar	3

Çizelge 2- AB 2002/96/EC yönergesine göre sınıflandırma.

Kategori	Uluslararası Etiket
Büyük ev aletleri	Large HH
Küçük ev aletleri	Small HH
Bilişim teknolojileri ve iletişim cihazları	ICT
Tüketici cihazları	CE
Aydınlanma donanımları	Lighting
Elektrikli ve elektronik aletler	E&E tools
Oyuncaklar, eğlence ve spor malzemeleri	Toys
Medikal cihazlar	Medical equipment
İzleme ve kontrol cihazları	M&C
Otomatik dağıtıcılar	Dispensers



Şekil 1- Dünya genelinde e-atık oluşumunun yıllara göre değişimi (son iki yıl tahmindir).

madencilik için ekonomik olmadığı ve bazı nadir metaller için “kent madencilik” olarak adlandırılan e-atıklardan yeniden kazanım üretim modelinin kullanışlı, kolay ve ekonomik olacağı görülmektedir. 2014 yılında e-atıklarda elde edilen altın miktarı 300 ton olarak gerçekleşmiştir. 2013 yılında küresel çapta altın madenlerinde üretilen altının (2270 ton) %11’ine karşılık gelmektedir (Ghosh vd., 2018).

E-atıklar, toplam atıklar içerisinde en hızlı büyüyen atık grubudur. Avrupa Birliği’nde e-atıkların büyüme hızı yıllık %3-4 arasındadır (Anonim, 2019e).

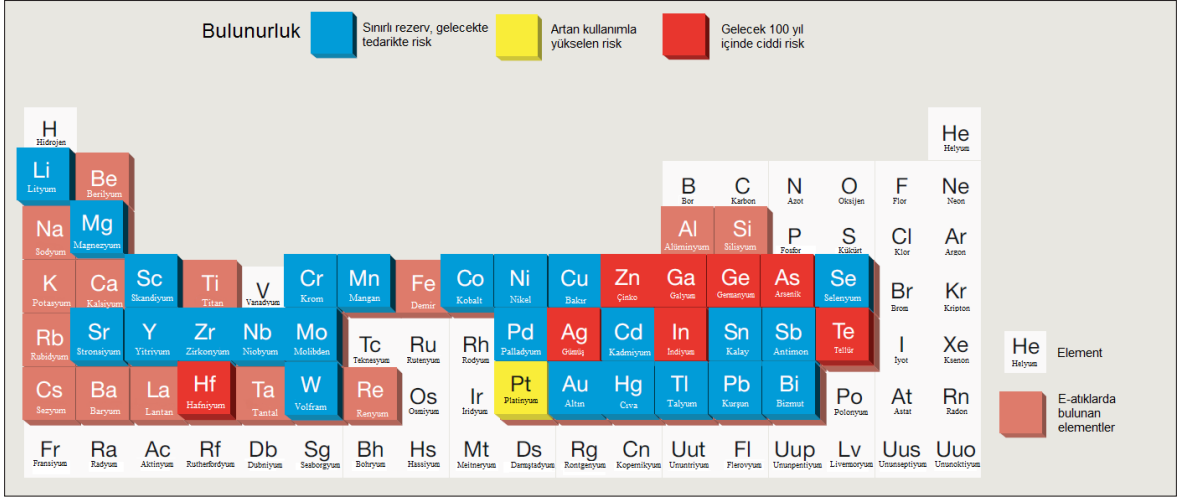
Avrupa Birliği’nde elektrikli ve elektronik orijinal cihaz üreticileri yeniden kullanım veya geri dönüşüm için e-atıkları almakla yükümlüdür (Messmann

vd., 2019). Avrupa Birliği’nde her yıl 10 milyon tondan fazla elektrikli ve elektronik cihaz piyasaya sürülmektedir, kişi başına yaklaşık 20 kg’dır. 2016 yılında kişi başına ortalama 8 kg e-atık toplanmıştır, 16,4 kg ile İsveç en çok e-atık toplarken Romanya’da bu rakam 1,6 kg’da kalmıştır. Toplam satılan elektrikli ve elektronik cihazların yaklaşık %40’ı yeniden kullanım veya geri dönüşüm için toplanmıştır (Anonim, 2019f).

Elektrikli ve elektronik cihazların üretiminde kullanılan metallerin üretildiği mineral rezervler tükenmektedir (Şekil 2 ve çizelge 3). Bu nedenle atıkların içerisinde bulunan değerli metallerin tekrar kullanıma kazandırılması gerekmektedir.

Çizelge 3- Sabit ve artan kullanım miktarlarında elementlerin tükenme süreleri (Kooroshy, 2010).

Elementler	Sabit Kullanım Miktarlarında Tükenme Süresi (yıl)	Atan Kullanım Miktarlarında Tükenme Süresi (yıl)
Platin (Pt)	360	42
Krom (Cr)	143	40
Nikel (Ni)	90	57
Bakır (Cu)	61	38
Altın (Au)	45	36
Çinko (Zn)	46	34
Gümüş (Ag)	29	9
Antimon (Sb)	30	13



Şekil 2- EEC’lerde kullanılan elementlerin bulunurluk riskleri (PACE, 2019).

E-atıklardaki değerli metallerin geri kazanımının yanı sıra içeriğindeki toksik metaller de çevre koruma ve insan sağlığı açısından dikkate alınmalıdır. Baryum (Ba), berilyum (Be), kadmiyum (Cd), krom (Cr), kurşun (Pb) ve antimon (Sb) e-atıklarda bulunan başlıca 6 metaldir (Oguchi vd., 2011). E-atıklar ayrıca metaller dışında önemli organik kirlenmeler içerir. Polibromlubifenil eter (PBDEs), polibromludifeniller (PBBs), tetrabromobisfenol-A (TBBPA), kloroflorokarbon (CFC), polihalojenliaromatik hidrokarbonlar (PHAHs), poliklorludibenzo-p-dioksinler (PCDDs) ve poliklorludibenzofuranlar (PCDFs) organik kirlenmelerin önemlilerindedir (Robinson, 2009). Bu tür zehirli bileşenleri içeren e-atıklar düzgün bertaraf edilmezse ciddi boyutta çevre sorunlarına yol açabilir.

### 3.3. E-Atıkların İçerikleri

Bileşenlerini oluşturan malzemelerin içerisinde bulunan çeşitli zehirli kimyasallar, metaller ve halojenlerden dolayı e-atıklar zararlı atık sınıfında yer almaktadır.

E-atıkları oluşturan bileşenler incelendiğinde bakır, çelik ve alüminyum gibi farklı metallerin yanı sıra plastik, cam ve seramik malzemelerden oluştuğu görülmektedir (Çizelge 4).

E-atıklarda bulunan metaller yaygın metaller, değerli metaller ve zehirli metaller olmak üzere 3’e ayrılır. Demir varlığının göstergesi olan çelik, telefon, masaüstü bilgisayar gibi cihazların gövde malzemesi olarak, bakır ise devre kablolarında kullanılır. Bakır artan kullanım ve azalan rezervlerden dolayı gelecekte değerlenme potansiyeli yüksek bir metaldir. Nikel bakır gibi devre yapılarında, Ni-Cd pillerinde ve yakıt hücrelerinde kullanılır. Alüminyum, genellikle dizüstü bilgisayarlar, PC’ler, akıllı telefon kasaları vb. gibi tümleşik devre tasarımı bileşenlerde bulunan bir metaldir. Avrupa Birliği’nde kullanılan alüminyumun yaklaşık %47’si geri dönüşümden sağlanmaktadır. Bu nedenle e-atıklardan alüminyum geri kazanımı yeni bir kaynak olarak çok önemlidir (Çizelge 5, 6, 7 ve 8).

Çizelge 4- E-atıklarda bulunan malzemelerin yaklaşık miktarı (Ghosh vd., 2018).

Malzemenin Cinsi	E-Atık İçindeki Yüzdeleri
Demirli metaller	38
Demir-dışı metaller	28
Plastikler	19
Cam	4
Ahşap	1
Diğerleri	10

Çizelge 5- Bazı e-atıklarda bulunan malzeme bileşimleri (%).

Ekipman Türü	Demirli Malzeme	Alüminyum Malzeme	Bakır Kablo	Plastik	Baskılı Devre Kartı
Buzdolabı	47,6	1,3	3,4	43,7	0,5
Çamaşır makinesi	51,7	2,0	3,1	35,3	1,7
Klima	45,9	9,3	17,8	17,7	2,7
LCD TV	43	3,8	0,8	31,8	11,6
Masaüstü Bilgisayar	47,2	-	0,9	2,8	9,4
Dizüstü Bilgisayar	19,5	2,4	1,0	25,8	13,7
Cep Telefonu	0,8	-	0,3	37,6	30,3
Mikrodalga Fırın	71,9	0,4	4,0	6,5	4,7

Çizelge 6- Bazı e-atıklardaki baskılı devre elemanlarının zehirli metal içeriği (ppm).

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

Çizelge 7- Bazı e-atıklardaki baskılı devre elemanlarının yaygın metal içeriği (ppm).

Ekipman Türü	Al	Cu	Fe	Sn	Zn
Buzdolabı	16000	170000	21000	83000	17000
Çamaşır makinesi	1000	70000	95000	9100	2400
Klima	6900	75000	20000	19000	4900
LCD TV	63000	180000	49000	29000	20000
Masaüstü Bilgisayar	18000	200000	13000	18000	2700
Dizüstü Bilgisayar	18000	190000	37000	16000	16000
Cep Telefonu	15000	330000	18000	35000	5000
Mikrodalga Fırın	14000	320000	400000	15000	28000

Çizelge 8- Bazı e-atıklardaki baskılı devre elemanlarının değerli metal içeriği (ppm).

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

### 3.4. E-Atıkların Oluşturduğu Sorunlar ve Geri Dönüşüm Süreçleri

Tehlikeli atık sınıfına giren e-atıklar geri dönüşüm sürecine girmese dahi insan ve çevre sağlığı için risk oluşturmaktadır. Özellikle açık alanlarda yapılan depolama veya kontrolsüz olarak bırakılmış e-atıklarda atmosferik koşulların etkisiyle içerdiği bazı metaller suya, toprağa ve havaya karışabilmektedir. E-atıkların geri dönüşüm sürecinde çok tehlikeli maddeler açığa çıkmaktadır. Özellikle uygun olmayan dönüşüm koşullarında oluşturduğu risk canlı ölümlerine ve çevre kirliliğine neden olmaktadır.

Gelişmiş ülkelerdeki işçi maliyetlerinin yüksekliği ve çevre koruma ile ilgili düzenlemelerin katı sınırlamalar getirmesi e-atıkların depolanma ve geri dönüşüm maliyetlerini yükseltmektedir. Bu nedenle bu ülkeler e-atıkları daha az gelişmiş ve daha az veya hiç çevresel koruma düzenlemeleri olmayan ülkelere ihraç etmektedir. E-atıkların geri dönüşüm için gelişmemiş ülkeler tarafından ithal edilmesi kısa vadeli ekonomik faydalar sağlamaktadır. Ancak ithalatçı ülkeler e-atığın uygun şekilde depolanması ve geri dönüştürülmesi için teknoloji, tesis ve kaynaklardan yoksundur. E-atıklar el ile çekiç, keski ve tornavida gibi aletler kullanılarak parçalarına ayrılır. Plastik kısımları uzaklaştırmak için açık ocaklarda yakma işlemi uygulanır, altın ve diğer metaller için açık asit banyolarında ekstraksiyon yapılır. Bu işlemler yapılırken çalışanlar için iş sağlığı ve güvenliği kuralları uygulanmamakta ve çevre kirliliğini önleyici hiçbir tedbir alınmamaktadır. Uygulanan bu ilkel tekniklerin yanı sıra eğitimsiz ve donanımsız çalışanlar e-atıklardaki toplam potansiyel getirinin yalnızca bir kısmını geri kazanabilmektedir.

Günümüzde sürdürülebilir kalkınma, genişletilmiş üretici sorumluluğu ve üretimde yeniden kullanma süreçleri kavramları artık birlikte yer almaya başlamıştır. Geri dönüşüm, onarım, yenileme ve yeniden üretim yeniden kullanmayı oluşturan süreçlerdir. E-atık miktarlarındaki hızlı artış diğer katı atık kategorilerinden daha acil bir çözüm arayışı gerektirmektedir.

Özellikle e-atıkların içerisinde bulunan metallerin geri kazanımı birincil kaynakların korunması açısından önemlidir. Aynı zamanda metalik hammaddelerin az ve hiç bulunmadığı ülkeler için kaynak oluşturmaktadır.

### 4. E-Atıklarda Bulunan Metallerin Geri Dönüşüm Yöntemleri

E-atıkların geri dönüşüm için işlenmesi heterojen bileşiminden dolayı oldukça güçtür. Geri dönüşümün

ilk basamağını muhafazalar, kablolar, devre kartları, ekranlar gibi belirli parçaların elle yapılan sökme işlemi oluşturmaktadır. Bir sonraki aşama elektronik atıkların işlenmesi ve geri dönüşüm aşamaları olup mekanik, kimyasal ve termal süreçleri içerir. Ayrıca biyoteknolojik veya birden fazla tekniğin birleşimi olan süreçler de bulunmaktadır.

#### 4.1. Mekanik İşlemler

E-atıklara uygulanan mekanik işlemler boyut küçültme, sınıflandırma ve ayırma basamaklarından oluşur. Yoğunluk, tane boyu, manyetik ve elektrik özelliklerinin farklılığı ayırma işleminde kullanılır (Gupta ve Yan, 2016). Genel olarak e-atıklar için mekanik işlemler elle yapılan sökme ve ayırma ile başlar. Ardından çekiçli kırıcılar ve bıçaklı değirmenler kullanılarak kırma ve öğütme işlemleri ile boyut küçültme yapılır ve takiben boyuta, yoğunluğa, manyetik ve elektriksel özellikler gibi faktörlere dayanan sınıflandırma yöntemleri kullanılarak içerdiği metali ayırmak için hazırlanır.

Geri dönüşümde uygulanan öğütme sürecinin amacı maden, kimya vb. sanayilerde kullanılma amacı ile aynı olup hammaddeden alınmak istenen maddenin diğer maddelerden serbest hale gelmesidir. Ayrıca yüzey alanının artırılması ile sonraki aşamalarda uygulanacak kimyasal süreçlerde aktif hale gelmesi de sağlanır. Elektronik atıklar içinde bulunan farklı metallerin birbirlerine göre serbestleşmesi de bu yöntemle sağlanmaktadır (Wills ve Finch, 2016). Klasik cevher zenginleştirme yöntemlerinde kullanılan serbestleşme derecesinin belirlenmesi yöntemi elektronik atıklara da uygulanabilmektedir (Gaudin, 1939). AEEC'lerin öğütülmesinde genellikle döner çekiçli kırıcılar ve bıçaklı değirmenler kullanılır. Döner çekiçli kırıcılar plastik ve metalin bir arada bulunduğu bu tür sünek malzemeler için en uygun kırıcı türüdür. Bu kırıcıların içinde oluşan gerilme kuvvetlerinin farklı yön ve şiddette öğütülen malzemeye uygulanması ince metal malzemenin öğütülmesinde etkili olmaktadır. Bıçaklı değirmenler özellikle elastik malzemenin öğütülmesinde etkindir. Bu iki öğütme cihazına ek olarak elastik malzeme öğütülmesinde kullanılan bir diğer öğütücü de kriyojenik öğütücülerdir. Burada öğütülecek malzeme sıvı azot yardımıyla soğutulmuş kırılabilir hale getirilir ve değirmen öğütme verimi artırılır. Bu değirmenler de öğütme yöntemleri aynıdır yalnızca malzemenin soğutulmasını sağlayan bir donanıma sahiptir (Veit ve Bernardes, 2015).

Devre kartları tüm elektrikli ve elektronik cihazlarda bulunan bir bileşendir. Dirençler, röleler, kapasitörler ve entegre devrelerden oluşan e-atıklar



içerisinde en karmaşık yapıya sahip, tehlikeli ve değerli bileşenler içeren bir atıktır. Geri kazanım sürecinin en önemli aşaması elde edilecek metalin serbestleşmesinin sağlanmasıdır. Devre kartları için kırma ve öğütme işlemi yeterli serbestleşmeyi sağlamamaktadır. Bu nedenle pirometalürjik sürecin bir aşaması olan yakma işlemi devre kartlarında serbestleşme için kullanılır. Mekanik işlemler devre kartlarının geri dönüşümünde sınırlı kalmaktadır (Ambrus vd., 2018). Basılı devre kartlarının geri dönüşümü için yapılan bir çalışmada atık devre kartları önce manuel olarak 50 x 50 mm'lik parçalara kesilmiş, daha sonra laboratuvar çapındaki darbeli kırıcıda 3 mm'nin altına öğütülmüştür. Ardından bilyeli değirmende 0,5 mm altına öğütülen atıklarda metalik bileşenlerin tane boyu büyük bölüntülerde yoğunlaştığı gözlenmiştir (He ve Duan, 2017). Devre kartlarının elle kesilmesinin ardından, kırıcı ile 10 mm ve sonra yüksek hızlı çekiçli değirmen ile 1,5 mm altına indirilmesi sağlanır. Böylece elde edilen atıklar pnömatik ayırma ve köpük flotasyonu işlemlerine hazırlanmıştır (Kumar vd., 2015).

Elektronik donanımlarda kullanılan malzemelerdeki düşük ara yüzey bağları nedeniyle bunların hurdalarında bulunan kompozitlerin içerdiği metallerin serbestleşmesi daha kolaydır. Genel olarak elektronik donanımların hemen hepsinde bulunan devre kartları ekleme, sarma, lehim gibi teknikler ile üretilir. Bu nedenle seramik, cam ve metal parçaların içerdiği metallerin serbestleşmesi için gerekli olan yoğun enerjiye devre kartlarında gerek yoktur (Zhang ve Forssberg, 1997). Çizelge 9 ve çizelge 10'daki verilere göre bilgisayar ve devre kartı hurdalarında <3 mm'lik bölüntülerde metal içeriğin yaklaşık tamamı serbestleşir. Büyük tane boyunda bakırın zayıf serbestleşme değeri bakır pimlerin plastik içine gömülü olması ve bakır tellerin plastikte sarılı olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca ferromanyetiklerde serbestleşme +16 mm'den büyük tane boyları dışındaki tüm tane boylarında iyi olduğu saptanmıştır (Zhang ve Forssberg, 1999).

Basılı devre kartlarının çok katmanlı yapısı nedeniyle liç işlemi sırasında kullanılan sıyırma çözümlerinin katmanlar arasında girmekte zorlandığı

Çizelge 9- PC hurdalarında ana metallerin serbestleşme derecesi (Zhang ve Forssberg, 1999).

Tane boyu aralığı (mm)	Kütle (%eleküstü)	Serbestleşme Derecesi (%)		
		Ferromanyetik	Al	Cu
+16	10,48	62,5	100,00	0,0
-16+9,5	25,07	94,6	100,00	50,0
-9,5+6,7	13,98	94,9	100,00	85,3
-6,7+4,75	9,44	87,0	-	93,2
-4,75+1,7	9,13	98,5	-	98,6
-1,7+0,6	10,85	100,00	-	99,0
-0,6+0,3	8,37	100,00	-	100,00
-0,3	12,68	100,00	-	100,00
Toplam	100	92,6		74,1

Çizelge 10- Devre kartı hurdalarında ana metallerin serbestleşme derecesi (Zhang ve Forssberg, 1999.)

Tane boyu aralığı (mm)	Kütle (%eleküstü)	Serbestleşme Derecesi (%)		
		Ferromanyetik	Al	Cu
+16	19,85	8,7		2,8
-16+9,5	16,91	80,0	100,00	15,4
-9,5+6,7	15,00	95,0	100,00	48,6
-6,7+4,75	12,71	95,4	-	62,5
-4,75+1,7	16,32	99,2	-	99,0
-1,7+0,6	10,46	100,00	-	99,0
-0,6+0,3	3,54	100,00	-	100,00
-0,3	5,21	100,00	-	100,00
Toplam	100	77,0		53,7

saptanmıştır. Bu nedenle boyut küçültme işlemleri yapılırken katmanların açılmasının metallerin geri kazanımı açısından önemli olduğu belirtilmiştir (Mecucci ve Scott, 2002).

#### 4.2. Hidrometalürji

Öğütülen ve sınıflandırılan atık yığınları bir dizi asidik veya bazik bir çözücü ile muamele edilir. Bundan sonraki aşamada ayrılması istenilen metal için çözücü ekstraksiyonu, çöktürme, sementasyon, iyon değiştirme, filtrasyon ve damıtma gibi işlemler uygulanması hidrometalürjik süreci oluşturur. Yakma işlemi bu süreçte yer almadığından hava kirliliği oluşmaması, metaller için yüksek seçicilik göstermesi ve diğer süreçlerden daha az maliyetli olması hidrometalürjik süreçlerin avantajlarıdır. Kompleks yapıdaki elektronik atıklarda çok fazla sayıda ve az miktarda metallerin bulunması ayırma işlemini güçleştirmektedir. Hacmi azaltmak için atıkların mutlaka mekanik işlemden geçirilmesinin gerekli olması, metalin çözücü ile temas etmediği sürece kimyasal çözünmenin olmaması ve metalin mutlaka serbest halde bulunması gerekmektedir. Çok miktarda çözücü gerekliliği ve atık suların korozif ve/veya toksik olabilmesi ve süreç sonucunda katı bir atığın ortaya çıkması hidrometalürjik sürecin zorlukları olarak sayılabilir (Veit ve Bernardes, 2015).

Hurda cep telefonlarının devre kartlarında bulunan altının kazanımı için yapılan çalışmada elektroliz ile üretilen klor gazının oksitleyici olarak kullanımı ve ardından iyon değiştirme ile altının diğer bileşenlerden ayrılması sağlanmıştır. Devre kartı %0,045 Au, %66 Cu ve %2,30 Ni içermektedir. Asit liçi ve iyon değiştirici reçine kullanılarak %99 saflıkta altın kazanımı sağlanmıştır (Kim vd., 2011).

Sheng ve Etsell (2007) kral suyu kullanılarak bilgisayar yongalarından altının geri kazanımı için uygulanan az maliyetli ve uygulanması kolay bir yöntem bildirmişlerdir. Bu yöntem üç aşamalı bir liç uygulamasını kapsamaktadır. Birinci aşamada yongalar nitrik asitle tepkimeye girer, tepkime sonucu toplanan epoksi reçineler ve yongalar kırılır. İkinci aşamada, birinci aşamada belirlenen optimize edilmiş sıcaklık, tepkime zamanı ve süspansiyon yoğunluğu gibi parametreler kullanılarak nitrik asit uygulaması tekrarlanır. Üçüncü aşama olan liç aşamasındaki kral suyu uygulaması ile yongalardaki altın tamamen çözülür. 2 g yonga başına 2 ml kral suyu kullanılmıştır, kral suyu miktarının artırılmasının ve karıştırma yapmanın altın kazanımını arttırmadığı saptanmıştır. Kral suyu çözeltisinde oluşan klor ve azot oksit gazlarının kendiliğinden bir karıştırma sağladığı da bildirilmiştir (Sheng ve Etsell, 2007).

Quinet vd. (2005) atık cep telefonlarından değerli metallerin geri kazanımında laboratuvar ölçekli yaptıkları çalışmanın ekonomik olarak olanaklı olduğunu bildirmişlerdir. Başlangıç malzemesi %27,37 bakır, %0,52 gümüş, %0,06 altın ve %0,04 paladyum içermektedir. Bu malzemeden kırma, öğütme ve ayırma işlemleri sonrası elde edilen 0,3 mm'lik elek altında kalan bölüntüye sülfürik asit liçi, klorür liçi, tiyoüre liçi, siyanür liçi, sementasyon, çöktürme, iyon değişimi ve aktif karbon adsorpsiyonu gibi bir dizi hidrometalürjik süreç uygulanmıştır. Bu işlemler sonucunda gümüşün %93'ü, altının %95'i ve paladyumun %99'unun geri kazanıldığı saptanmıştır (Quinet vd., 2005).

Chmielewski vd. (1997) tarafından elektronik atıklarda altın geri kazanımı üzerine geliştirilen hidrometalürjik süreç 5 aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar şöyledir: 1- Atıkların kavrulması ve düşük sıcaklık karbonizasyonu. 2- Gümüş ve diğer metalleri uzaklaştırmak için nitrik asit liçi. 3- Kral suyu ile liç. 4-Dietil malonat ile seçici çözelti ekstraksiyonu. 5- İndirgenme ile organik fazdan metalik altının ayrılması (Chmielewski vd., 1997).

Çin'de alınmış bir patente plastik içeren bir elektronik atıktan Ag, Au, Pd gibi değerli metallerin geri kazanımı tanımlanmıştır. Atıklar plastik içeriğinin uzaklaştırılması için 400-500°C sıcaklık aralığında, 8 ila 12 saat süresince ısıtılmıştır. Geriye kalan ham metal, 90°C'de HCl veya H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile işlenerek temel metallerin çözünmesi sağlanmıştır. Ardından yapılan süzme işleminden kalan kalıntıya gümüşü çözmek için seyreltik HNO<sub>3</sub> ile katı/sıvı oranı 1:2 olacak şekilde 60°C'de işlem uygulanmıştır. Sonuçta, HCl ve NaClO<sub>3</sub> çözeltisi altın ve paladyum liçi için kullanılmıştır. Bu yöntem ile değerli metallerin geri kazanımının %92'ye kadar ulaştığı bildirilmiştir (Cui ve Zhang, 2008).

Kogan (2006) tarafından patenti alınan geri dönüşüm sürecinde 180 g/L HCl ve 250 g/L MgCl<sub>2</sub> içeren çözeltiye eklenen e-atıkların içerdiği alüminyumun %98'inin, kalayın %94'ünün, kurşunun %96'sının ve çinkonun %94'ünün çözeltiye geçtiği belirlenmiştir. Bu işlemde kalan katı çöktürme bakırı kazanmak için 50 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 200 g/L MgCl<sub>2</sub> içeren çözeltiyle 2,5 saat süresince 80°C'de çözme işlemi yapılmıştır. Liç sistemi 550 mV redoks potansiyeline sahiptir bu potansiyel posaya %50'lik hidrojen peroksit çözeltisi katılarak ayarlanmıştır. Sonuç olarak bu yöntemle bakırın %96'dan, nikelin %98'den fazlası kazanılmıştır. Bu işlemin ardından yapılan süzme ve yıkama işleminden kalan katı değerli metalleri geri kazanmak için 30 g/L HCl ve 180 g/L bromür iyonları içeren asidik sodyum bromür çözeltisine eklenmiştir.



Elde edilen karışım %10'luk tribütil fosfat ve kerosen ile hazırlanan triizobütilfosfinsülfoksit çözeltisine çok hızlı karıştırılırken eklenir. Bunlara ek olarak redoks potansiyelini 850 mv olarak ayarlamak için liç sistemine %50'lik hidrojen peroksit çözeltisi eklenir ve sıcaklık 60°C'nin üzerine çıkarılmaz. 3 saat boyunca organik çözücü ile karıştırılan çözeltiden altının %98'i, gümüşün %84'ü, paladyumun %96'sı ve platinin %92'si organik çözücüye geçer. Daha sonra organik çözücü içindeki altın, asidik ortamda çinko tozu ile çöktürülerek alınır (Kogan, 2006).

Basılı devre kartlarından bakır geri kazanımı için önerilen yöntemlerin arasında yer alan elektrikli özütleme sürecinde kral suyu ve sülfürik asit çözeltileri olmak üzere iki farklı çözelti kullanılmıştır. Çalışmada bakırın geri kazanılmadan her iki çözeltide de bozduğu gözlenmiştir. Kral suyu ile yapılan özütleme işleminde bozunma zaman aralığının sülfürik asit çözeltisi ile yapılan özütlemeye göre daha hızlı gerçekleştiği belirlenmiştir. Kral suyunda bulunan NO<sub>3</sub> iyonları oksitleyici ajan olarak davrandığından elektrikli özütleme işleminde bakır geri kazanım verimini düşürdüğü bildirilmiştir (Veit vd., 2006).

Bakır, kurşun ve kalay gibi temel metallerin e-atıklardan geri kazanımı için uygulanan hidrometalürjik yöntemlerde özellikle bakır ve kurşun geri kazanımının, ortam pH değerine oldukça bağlı olduğu belirlenmiştir. Özellikle basılı devre kartlarındaki metalin geri kazanımında, atığın sahip olduğu tabakalı yapıdan dolayı kullanılan kimyasalların tabakalar arasına yeterli miktarda giremediği saptanmıştır. Bu nedenle sürecin başlangıcında yapılan kırmanın kritik basamak olduğu vurgulanmıştır. Özellikle bakır ve kurşunun ortam pH'ından en fazla etkilenen metaller olduğu belirlenmiştir. 0,5 M HNO<sub>3</sub>'te, 20 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda maksimum %43 CE (akım verimi) elde edilmiş, verimlilik hem azalan akım yoğunluğu hem de artan asit derişimi ile düşmüş ve 5 M HNO<sub>3</sub>'te yaklaşık %5 olarak bulunmuştur (Mecucci ve Scott, 2002).

Hurda cep telefonlarının basılı devre kartlarından altının, liç yöntemi ile kazanılması çalışmasında gerekli olan klor elektroliz yöntemiyle elde edilmiş ve oksidasyon ajanı olarak kullanılmıştır. Oksidasyon süreci sonrasında iyon değiştirme yöntemiyle altın geri kazanımı sağlanmıştır. Liç deneyleri, bir Cl<sub>2</sub> gazı üreticisinin anot bölgesine bağlı ayrı bir liç reaktörü kullanılarak liç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Liç değişkenlerinden klor gazı derişimi ve sıcaklık artışı düşük asit derişimlerinde bile altın kazanımı için uygun koşulları sağlamıştır. Oysa bakır liçi için yüksek

asit derişimleri ve düşük sıcaklığın uygun olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle iki aşamalı bir liç işlemi tasarlanarak birinci aşamada bakır liçi için 714 A/m<sup>2</sup>'lik bir akım yoğunluğunda elektroliz ürünü klorür ile 2 mol/L HCl ve 165°C'de 165 dakikada bakırın %97'si çözülmüştür. Bu aşamada altının sadece %5'lik bir kısmı geri kazanılmıştır. İkinci aşamada elektroliz ürünü klorür ile 0,1 mol/L HCl ile birinci aşamadan kalan altının %93'ü (67 mg/L) çözülmüştür. Elde edilen liç çözeltisinden altının geri kazanımında Amberlite XAD-7HP reçenesi kullanılmıştır, 46,03 mg/g reçene adsorpsiyon oranı ile altının %95'i geri kazanılmıştır. İyon değiştirme işlemi sonrasında %99,9 saflıkta 6034 mg/L yoğunlaştırılmış çözelti elde edilmiştir (Kim vd., 2011).

Geleneksel hidrometalürjik yöntemler genellikle siyanür ve kral suyu kullanılan süreçlerden oluşur. Altın, gümüş ve hatta platin grubu metallerin üretiminde siyanür liçi kullanılır. HCN'nin pH<8,2 olduğu durumlarda uçucu olduğu bilinmektedir, bu durum özellikle siyanür kullanılan üretim süreçlerinde çalışanlar için ciddi riskler oluşturmaktadır. Dünya genelinde çeşitli madenlerde meydana gelen kazalar siyanür liçinin kullanımı konusunda ciddi endişelerin oluşmasına neden olmuştur. Bu nedenlerden dolayı değerli metallerin geri kazanımında siyanürsüz ortamlar (tiyoüre, tiyosülfat, halojenür vb.) önerilmiştir (Ding vd., 2019).

Çevresel etkiyi azaltmak için çeşitli araştırmalar sonucunda yeni hidrometalürjik yöntemler geliştirilmiştir. Tiyosülfat, tiyoüre ve tiyosiyanat gibi bazı siyanür içermeyen liç ajanları kullanılmıştır (Ding vd., 2019).

Tiyosülfat liçi siyanür ve kral suyu liçi ile karşılaştırıldığında daha düşük altın geri kazanımı göstermiştir. Liç verimini arttırmak için Cu<sup>+2</sup> katalizör olarak kullanılmıştır. Ancak Cu<sup>+2</sup> aynı zamanda tiyosülfatın parçalanmasını arttırdığından bu durumu önlemek için ortama amonyak eklenmiştir (Breuer ve Jeffrey, 2000).

Tripathi vd. (2012) hurda cep telefonlarının basılı devre kartlarının geri dönüşümünde amonyum sülfat ve bakır sülfat derişimlerinin, pH ve pulp yoğunluğunun altın liç hızına etkisini incelemiştir. 0,1 mol/L amonyum sülfat, 40 mmol/L bakır sülfat ve pH 10-10,5 optimum koşullarında %56,7 altın geri kazanım oranına ulaşılmıştır. Basılı devre kartlarına bütün ve öğütülmüş olarak liç işlemi uygulanması sonucunda altın geri kazanım oranları sırasıyla %78,8 ve %30,35 olarak gerçekleşmiştir. Aynı şekilde bütün ve öğütülmüş atıklarda yapılan bakır geri kazanımı ise sırasıyla 1,53 g/L ve 11,8 g/L olarak ölçülmüştür. Bakır çözünürken tiyosülfat iyonlarını

tüketmiş bu nedenle geri kazanılan altın miktarı azalmıştır. Tiyosülfat liçinden önce ortamdan bakırın uzaklaştırılmasının gerektiği saptanmıştır (Tripathi vd., 2012).

Tiyosülfat derişiminin artırılması ile altın liç hızının arttığı görülmüş ancak derişim kritik değeri aşıldığında liç hızı düşmeye başlamıştır. Liç hızının düşme nedeni ortam pH'sının tiyosülfat derişimine duyarlı olmasıdır. Bir takım analiz verisi ve varyans hesabı kullanılarak altın liçi için kuadratik matematiksel bir model oluşturulmuştur. Altının tiyosülfat kullanılarak yapılan liçi için en uygun koşullar 72,71 mmol/L tiyosülfat, 10 mmol/L  $Cu^{2+}$  ve 0,266 mol/L amonyak olarak belirlenmiştir (Ha, vd., 2010).

Lee vd. (2012) hurda cep telefonlarının basılı devre kartlarının tiyoüre ile liçi üzerine yürüttükleri çalışmada 25°C'de 2 saat süre ile 24 g/L  $CS(NH_2)_2$ , %6  $Fe^{+3}$  varlığında gerçekleştirilen liç işlemi ile %89,67 Au ve %48,3 Ag geri kazanımı sağlanmıştır.

Altının halojenürler (klor, brom ve iyot) ile  $Au^+$  ve  $Au^{3+}$  kompleksleri oluşturarak ekstraksiyonu yapılmaktadır. Klorlama, basılı devre kartlarından altının geri kazanılmasında kullanılan yüksek liç hızı, daha az çevre kirliliğine yol açan bir liç ajanı olması ve redoks potansiyelinin kontrolü ile farklı metallerin liç işleminde kullanılma olanağına sahip olan bir yöntemdir (Ding vd., 2019).

He ve Xu (2015), klorürü ve sodyum klorat kullanarak basılı devre kartlarından altının %99 oranında geri kazanıldığını yaptıkları çalışma ile ortaya koymuşlardır. Süperkritik su oksidasyonu (SCWO) ön işleminden sonra iyot-iyodür liçi ile hurda devre kartlarındaki Au, Ag ve Pd geri kazanılmıştır (Xiu vd., 2015).

Bir çok geri dönüşüm yönteminde e-atıklarda metal ve ametallerin ayrılmasında ince kırma ve öğütme sırasında değerli metallerin %10-35 arasında değişen miktarlarda kayıp yaşanır (Ding vd., 2019). Bu durumun önüne geçmek için büyük parçalar halindeki devre kartlarında HCl,  $HNO_3$ ,  $H_2SO_4$ ,  $C_2H_4O_2$  ve  $C_6H_8O_7$ 'nin liç ajanı olarak kullanıldığı bir yöntem uygulanmıştır. 4x4 cm'lik parçalar 22 saat boyunca HCl çözeltisinde bekletilmiş ve Au, Ag ve Pd'nin tamamı çözünmüştür.  $HNO_3$  ile 96 saatte %96'lık bir çözünme değeri,  $H_2SO_4$ ,  $C_2H_4O_2$  ve  $C_6H_8O_7$  için 100 saatte %10'nun biraz üzerinde çözünme görülmüştür (Jadhav ve Hocheng, 2015).

#### 4.3. Biyoteknoloji

Metal geri dönüşümünde bakteri kullanımı büyük ölçekli uygulamalarda yaygın değildir. Metal

çözmede ve elektronik atıklardan altın kazanımında kullanılmaktadır. Süreç diğerlerine kıyasla oldukça az atık ve toksik gaz üretmektedir. Biyo-hidrometalurjik işlemler, metallerin farklı bakteri kültürleri tarafından liç işlemini içerir. Bu işlemin en önemli dezavantajları çok uzun liç süresi ve metal içeriğinin üst tabakada bulunması gerekliliğidir, bakteriler alt tabakalara ulaşmamaktadır (Veit ve Bernardes, 2015).

İlyas vd. (2013) laboratuvar ölçekli kolon reaktörler ve çalkalayıcı kullanarak e-atıklardan metal kazanımında orta dereceli termofilik bakteri konsorsiyumu kullanılmasını incelemiştir. Çalışmada, ortama enerji kaynağı ( $FeS_2$ ,  $S^0$ ,  $FeS_2+S^0$ ) eklenmesinin, farklı bakteri konsorsiyumlarının kullanılmasının ve ön işleminde farklı yıkama ajanlarının liç üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Hurda derişimi %10 iken *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* ve *Thermoplasma acidophilum* bakteri konsorsiyumu ile %1  $FeS_2+S^0$  ile ön işlem uygulanmış atıktan erlen çalkalayıcısında 12 gün süren işlem sonrasında bakırın %90'ı, alüminyumun %80'i, nikelin %82'si ve çinkonun %85'i kazanılmıştır. Kolon kullanılarak yapılan biyoliç işlemi 165 günde tamamlanmıştır, *S. thermosulfidooxidans* ve *S. Acidophilus* bakteri konsorsiyumu çinkonun %74'ü, alüminyumun %68'i, bakırın %85'i ve nikelin %78'i geri kazanılmıştır. Zhu vd. (2011) asidofilik bakteri kültürü kullanarak basılı devre kartlarından metal geri kazanımında pH, Fe(II) derişimi, parçacık boyutu, aşılama miktarı gibi değişkenlerin liç işlemine etkisini incelemiştir. Özellikle başlangıç pH'ının ve Fe(II) derişiminin bakır ekstraksiyonunda ve çökelti oluşumunda önemli rol oynadığını belirlemişlerdir. pH 2, Fe(II) derişimi 12 g/L, %10 aşılama miktarı ve 60-80 mesh tane boyu aralığı optimum koşullarında 45 saatte bakırın %98'i, aynı şartlarda 98 saatte alüminyumun %88,2'si, çinkonun %91,6'sı geri kazanılmıştır.

*Chromobacterium violaceum* ikincil bir metabolit olarak siyanür üretir. Bu siyanür e-atıklarda bulunan altın ile altın-siyanür kompleksi oluşturur. Bu yöntem ile elektronik atıklardan altın geri kazanımına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Natarajan ve Ting, (2014) çalışmasında ön işlem ve alkaliye dayanıklı mutasyon geçirmiş bakteriler kullanılarak e-atıklardan geri dönüşüm çalışılmıştır. Ön işlem olarak nitrik asitle çözme işlemi uygulanmış altın dışındaki metallerin çözünmesi sağlanarak siyanürün diğer metaller ile tepkimeye girmeden sadece altın ile etkileşmesi sağlanmıştır. HCN'nin pKa değeri 9,3'tür, alkali pH biyoliç için siyanür iyonu derişimini artırır bu pH değerinde mutasyonla adapte edilmiş bakteriler kullanılmıştır. *C. violaceum* bakterisinin fizyolojik pH değeri 7 civarındadır, mutasyonla daha yüksek pH değerlerine dayanıklı hale getirilmiş bakteriler ile

yapılan biyoliç ile pH 9'da %18, pH 9,5'da %22,5 ve pH 10'da %19 verimle altın kazanılmıştır. Adapte edilmemiş bakteri ile yapılan biyoliç ile veri %11 civarındadır. Böylece mutasyon ile adapte edilmiş bakteri ile altın geri kazanım veriminin artırılabilceği ortaya konulmuştur (Natarajan ve Ting, 2014).

Brand vd. (2001), bakteri ve mantarlar ile elektronik atıklardan metal liçini inceledikleri çalışmada mikrobiyolojik süreç ile atık içindeki metalleri serbestleştirmişlerdir. E-atıklar içinde olgunlaştırılan bakteri ve mantarlar sırasıyla Thiobacillusthiooxidans ile T. Ferroxidans ve Aspergillusniger ile Peniciliumsimplicissimum olarak seçilmiştir. Ortamda oluşan inorganik ve organik asitler metallerin serbestleşmesini sağlamıştır. E-atık derişimi 10 g/L'yi geçtiğinde mikrobiyal gelişme durmuştur. Bununla birlikte uzun adaptasyon süresinde hurda yoğunluğu 100 g/L'ye kadar çıkmıştır. Her iki mantar suşu Cu ve Sn'nin %65'ini, Al, Ni, Pb ve Zn'nin %95'ini serbestleştirmiştir. Hurda derişimi, 5-10 g/L arasında olduğunda Thiobacili bakterisi ile Cu, Zn, Ni ve Al içeriğinin %90'dan fazlasının liçi başarılmıştır. Pb, PbSO<sub>4</sub> olarak Sn, SnO olarak çöktürülmüştür.

Wei vd. (2019), e-atıklardan bakırın biyoliç ile geri kazanımında doğru akım (DC) elektrik alanı ile çalışan biyoelektrik reaktörü kullanmışlardır. 40 mA elektrik akımı uygulandığında 3 günde %100 liç verimiyle bakırın geri kazanımı sağlanmıştır. 4 gün sonunda geri kazanılan bakır toplam bakırın %97'sidir. DC elektrik alanının, demir oksitleyici bakterilerin aktivitesini ve büyümesini geliştirdiğini, böylece Fe<sup>+2</sup> oksidasyonunu kolaylaştırdığını ortaya konmuştur. Bu yöntem basılı devre kartlarından bakırın kazanılmasında kolaylıkla uygulanabilmektedir. Fonksiyonel Acidithiobacillus, biyoliç verimliliğini arttırmak için DC elektrik alanı tarafından seçici olarak zenginleştirilmiştir.

#### 4.4. Pirometalürji

Pirometalürjik işlemler özellikle de yakma e-atıklardan metal kazanımında geleneksel yöntem haline gelmiştir. Klasik bir pirometalürjik işlem, hedeflenen metalin derişimini arttırmak için diğer tüm fazları cürufa veya gaz fazına dönüştürme işleminden oluşur. Pirometalürjik işlemin en büyük avantajı herhangi bir ön işlem gerektirmeksizin doğrudan her türlü e-atığa uygulanabilir olması ve çok az işlem basamağı içermesidir. Ancak atıkların içerdiği polimerler ve yalıtkan malzemelerin dioksin ve furan oluşturarak yanması çok önemli hava kirliliğine neden olmaktadır. Bu yöntemde bazı metaller klorürünü oluşturarak buharlaşır. Seramik ve cam içerikler cüruf miktarını arttırmaktadır. Bu yöntemle kalay (Sn) ve

kurşun (Pb) geri dönüşümü çok düşük, alüminyum (Al) ve çinko (Zn) metallerinin ise neredeyse imkânsızdır (Veit ve Bernardes, 2015).

E-atıkların açık fırınlarda kontrolsüz yakma ile geri dönüşümü yasal olmayan işletmelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. E-atıklardan metalleri ayırmada ve derişimini arttırmada etkili bir yöntemdir. Yasal e-atık dönüşüm tesislerinde kullanılan son teknoloji eriticiler ve artırcılar metalleri kazanmakta ve çok miktardaki e-atıktan kaynaklanan çevresel etkiyi kısa sürede azaltmaktadır. Ancak pirometalürjik süreç tek başına e-atıklardan metallerin kazanımı için yeterli değildir. Bu sürecin ardından asit liçi veya elektro metalürjik işlemlerle metaller geri kazanılmaktadır. Yakma sonucu elde edilen metal fazındaki elementlerin oluşturduğu bileşikler %60-80 arasında bakırın yanı sıra kurşun, kalay, antimon ve nikel içermektedir. Süreç sonucunda elde edilen siyah bakır, elektro rafınasyon ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> liçi ile özütlenerek metal kazanımı sağlanır. Eğer bu işlem açık yanma ile yapılırsa tehlikeli gaz, atık su ve kalıntı ortaya çıkmaktadır. Bu durum çevre ve insan sağlığı için ciddi riskler oluşturmaktadır. Pirometalürjik süreçler yıllar içerisinde maksimum geri kazanım – minimum kirlilik oluşturacak şekilde iyileştirilmiştir. Günümüzde pirometalürji, geri dönüşümde endüstriyel boyutta kullanılmaktadır (Veit ve Bernardes, 2015).

Eritme yoluyla siyah bakır eldesi uygulama kolaylığı ve ekonomik olması açısından yaygın olarak kullanılmaktadır. Pirometalürjik geri dönüşüm yöntemlerinin en önemlileri dünyada bu alanda söz sahibi şirketlerin adıyla özdeşleşmiştir. Sektörün büyük metalürji şirketlerinden biri tarafından yılda 250.000 ton farklı e-atık bu yöntemle işlenmektedir, bu miktar bir yılda ortaya çıkan tüm e-atıkların yaklaşık %10'una denk gelmektedir (Lee vd., 2012). Isasmelt fırınında bakır ve kurşunu eritme, bakır liçi, elektroliz ile kazanım ve değerli metallerin saflaştırılması yakma sürecinin ana bileşenleridir (Hagelüken, 2006).

Rouyn-Noranda, Quebec Kanada'da bulunan Horne Smelter fırını, bakır ve değerli metalleri içeren elektronik atıkların işlenmesinde kullanılan dünyanın en büyük atık eritici fırınıdır. Tam kapasiteyle çalıştığında bakır ve değerli metaller taşıyan atıkların dönüşümü için kapasitesi 840.000 tondur. Noranda süreci olarak adlandırılan bu yöntemde işlemler, atık malzemenin 1250°C'deki erimiş metal banyosuna daldırılmasıyla başlar, yaklaşık %39 oksijen içeren hava yardımıyla karıştırılır. Atık malzemede bulunan plastik ve diğer yanıcı maddelerinde yanması sonucu enerji maliyetlerinde düşüşte sağlanmış olur. Aşırı oksijenle yapılan bu eritme işlemi bakırın yanı

sıra demir, çinko ve kurşun safsızlıkları oksitlerini oluşturarak, cüruf içinde kararlı hale gelir. Cüruf daha fazla metal kazanımı için soğutulup öğütülür. Değerli metalleri de içeren bakır matı çıkarılır ve dönüştürücülere aktarılır. Konvertörlerde yükseltgenerek elde edilen sıvı blister bakır anot fırınlarında rafine edilerek %99,1 saflıkta bakır kazanılır. Kalan %0,9'lık kısım altın, gümüş, platin ve paladyum gibi değerli metallerin yanı sıra selenyum, tellür ve nikel gibi geri dönüştürülebilir metalleri de içerir. Bu kısım için elektrometalürjik işlemlerle saflaştırma yapılarak metaller satılabilir saflığa ulaşır (Veldhuizen ve Sippel, 1994).

İsveç'te bulunan bir metalürji şirketine ait Rönskar Smelter kullanılarak yapılan geri dönüşüm işlemi beslenen atığın saflığına göre değişmektedir. Yüksek oranda bakır içeren atık doğrudan dönüşüm sürecine girerken daha düşük bakır içeriğine sahip atıklar patentli Kaldö sürecinde işlenmektedir (Leirnes ve Lundstrom, 1983). Kaldö sürecinin sonunda bir bakır alaşımı (Cu, Ag, Au, Pd, Ni, Se ve Zn karışımından oluşan) ve toz metal karışımı (Pb, Sb, In ve Cd) elde edilir ve bundan sonra elektrometalürjik süreçlere gönderilerek metallerin kazanımı sağlanır (Cui ve Zhang, 2008).

Erimiş tuz oksidasyonu kullanılarak yapılan alkali eritimi plastik ve seramikleri ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  vb.) metallerden ayırmak için kullanılan alternatif bir yöntemdir. Kurşun, kalay ve diğer amfoterik metaller ve seramikler eriyik alkali ile tepkimeye girer ve çözünebilir tuz oluşturur. Ayrıca hidrokarbon zincirleri de erimiş alkali bileşiklerle kırılabilir. Bakır ve değerli metaller katı kısımda kalır ve ardından basit bir liç işlemi ile kolaylıkla ayrılır (Ding vd., 2019).

KOH – NaOH karışımının  $300^\circ C$ 'deki eriyiği kullanılarak 2 L/saat Ar gazı akışı altında basılı devre kartlarından bakırca zengin metalik kısım ayrılmıştır. Metalin yanı sıra kahverengi bir toz elde edilmiştir (Flandinet vd., 2012; Stuhlpfarrer vd., 2016).

$NaNO_3$ -NaOH ikilisinin alkali olarak seçildiği eritme yönteminin ardından uygulanan liç sürecini içeren eritme-liç-ayırma olarak adlandırılan yöntemde atık olarak, kırılıp ayırmadan geçirilmiş basılı devre kartları kullanılmıştır. Eritme işlemi sonucu atıklarda bulunan Pb, Zn ve Al gibi amfoterik metallerin tamamı çözünebilir tuzlara dönüşerek yıkama ile ayrılmıştır. Kalan katıya uygulanan  $H_2SO_4$  liçi ile bakır ayrılmıştır. Değerli metaller  $H_2SO_4$  ile çözünmediğinden liç işleminin kalıntısı ile değerli metaller zenginleştirilmiştir. Kütlece  $NaNO_3$ :NaOH:Atık oranı sırasıyla 3:4:1, eritme sıcaklığı  $500^\circ C$  ve eritme süresi 90 dakika bu sürecin optimal koşulları olarak saptanmıştır (Guo vd., 2015).

## 5. Sonuç

İkincil kaynaklardan metal kazanımı geniş bir çalışma alanı olup endüstriyel olarak uygulanmaktadır. Ancak ülkemizin de dâhil olduğu birçok ülkede e-atıklar geniş depolanma alanlarında biriktirilmekte ve büyük bir kısmı geri dönüşüme girmemektedir. Böylece e-atıkların içerdiği değerli metaller atıl kalarak ekonomik olarak da kayba neden olmaktadır.

E-atıkların geri dönüşümünde yaygın olarak pirometalürjik yöntemler kullanılmaktadır. Geri dönüşüm piyasasını bu yöntem belirlemektedir. Ancak bu yöntem de yakma sonucu ortaya çıkan gazların yarattığı çevre sorunları ve minör elementlerin kaybı maliyetleri arttırmaktadır. Son yıllarda hidrometalürjik yöntemler kullanılarak metal kazanımı üzerine yapılan çalışmalar artmış ve farklı e-atıklarda kullanılabilirliği ortaya konulmuştur. Endüstriyel olarak uygulamaları e-atıklarda majör ve minör metallerin önemli bir kısmının geri kazanımını sağlamıştır. Böylece e-atıklardan metal kazanımı daha ekonomik hale gelmiştir.

E-atıklardan metal geri kazanımı metalik maden kaynaklarının tükenmekte olduğu günümüzde kritik bir konu haline gelmektedir. Önemli bir elektronik ithalatçısı olan ülkemiz için e-atıklar değerli metallerin üretimi için önemli bir kaynak oluşturma potansiyeli vardır. Böylece hâlihazırda ithal edilmiş olan elektronik eşyanın atığından değerli metal kazanımı sağlanırsa ikinci bir ithalat kapısı olan metal ithalatı azaltılabilecektir. 2019 yılının ilk yarısında Türkiye'de cep telefonu satışlarının tutarı 1,8 milyar avro olarak gerçekleşmiştir. Türkiye yılda ortalama 12 milyon adet cep telefonu ithal etmektedir. 2007-2017 yılları arasında gerçekleşen cep telefonu ithalatı 142 milyon adetten fazladır (Anonim, 2019g). Bu rakamlar görüldüğü gibi sadece cep telefonları içindir. Bunun yanında dizüstü ve masa üstü bilgisayarlar, tabletler, televizyonlar vd. elektrikli ve elektronik eşya da eklendiğinde ciddi bir geri dönüşüm potansiyeli ortaya çıkmaktadır. Türkiye'deki Iphone marka telefon sayısı 10 milyon adetten fazladır. Bu sayıdaki telefon potansiyel olarak 150 ton alüminyuma, 110 kg altına, 630 kg gümüşe, 3,2 ton nadir yer elementine, 8,3 ton tungstene, 1 ton bakıra, 2,9 ton kalaya, 79 ton kobalta ve 1400 ton çeliğe karşılık gelmektedir. Rakamlar sadece bir marka telefona ait metal içeriğini göstermektedir. Dünya'da pek çok ülke bu konuda önemli adımlar atmaktadır (Anonim, 2019h). Türkiye en kısa sürede e-atıklar için endüstriyel boyutta tam kapasite geri dönüşüm yapabilir hale gelmelidir.

Ayrıca klasik metal madenciliğinin çevreye verdiği zarar ile karşılaştırıldığında e-atıkların geri dönüşüm sürecinin oluşturduğu çevresel etki daha



azdır. Geri dönüşüm süreci klasik madencilğe göre çevresel etki anlamında kontrol edilebilirliği daha yüksek bir süreçtir.

### Değerlenen Belgeler

Ambrus, M., Nagy, S., Muksi, G. 2018. The comminution of PCB and LED in order to improve metal recovery. XXXII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, University of Miskolc, 5-6 September, ISBN 978-963-358-162-9.

Anonim 2019a. Web sitesi: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ac89e64f-a4a5-4c13-8d96-1fd1d6bcaa49.0004.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ac89e64f-a4a5-4c13-8d96-1fd1d6bcaa49.0004.02/DOC_1&format=PDF) Erişim tarihi: 15.10.2019

Anonim 2019b. Web sitesi: <http://www.basel.int/Implementation/Ewaste/Overview/tabid/4063/Default.aspx> Erişim tarihi: 15.10.2019

Anonim 2019c. Web sitesi: <http://www.oecd.org/environment/waste/extended-producer-responsibility.htm> Erişim tarihi: 15.10.2019

Anonim 2019d. Web sitesi: [http://www.step-initiative.org/files/\\_documents/whitepapers/StEP\\_WP\\_One%20Global%20Definition%20of%20E-waste\\_20140603\\_amended.pdf](http://www.step-initiative.org/files/_documents/whitepapers/StEP_WP_One%20Global%20Definition%20of%20E-waste_20140603_amended.pdf) Erişim tarihi: 15.10.2019

Anonim 2019e. Web sitesi: <https://www.ioe-emp.org/en/news-events-documents/news/news/1555071438> Erişim tarihi: 11.10.2019

Anonim 2019f. Web sitesi: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics\\_-\\_electrical\\_and\\_electronic\\_equipment](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_electrical_and_electronic_equipment) Erişim tarihi: 17.10.2019

Anonim 2019g. Web sitesi: <https://www.ntv.com.tr/galeri/teknoloji/iste-turkiyede-yilin-ilk-yarisinda-akilli-telefonlara-harcanan-para,03sKS7BVKEOe7XCmK5rTxw/-XQqLxbEg0SXbvCgNyhJjQ> Erişim tarihi: 20.10.2019

Anonim 2019h. Web sitesi: <https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-49781317> Erişim tarihi: 19.10.2019

Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P. 2017. The Global E-Waste Monitor 2017, UNU, ITU, ISWA.

Brand, H., Bosshard, R., Wegmann, M. 2001. Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi. *Hydrometallurgy*, 59, 319-326.

Breuer, P. L., Jeffrey, M. L. 2000. Thiosulfate leaching kinetics of gold in the presence of copper and ammonia. *Miner. Eng.*, 13(10-11), 1071-1081.

Cayumil, R., Khanna, R., Rajarao, R., İkrām-ul-Hag, M., Makherjee, P.S., Sahawakla, V. 2016. *Environmental*

*Impact of Processing Electronic Waste-Key Issues and Challenges*, DOI : 10.5772/64139.

Chmielewski, A. G., Ubranski, T. S., Migdal, W. 1997. Separation technologies for metals recovery from industrial wastes. *Hydrometallurgy*, 45(3), 333-344.

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

Ding, Y., Zhang, S., Liu, B., Zhang, H., Chang, C., Ekberg, C. 2019. Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalyst: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 284-298.

Doan, L. T. T., Amer, Y., Lee, S. H., Phuc, P. N. K. 2019. Strategies for E-Waste Management: A Literature Review. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Energy and Environmental Engineering* 13, 3, 157-162.

Flandinet, L., Tedjar, F., Ghetta, V., Foulletier, J. 2012. Metals recovering from waste printed circuit boards (WPCBs) using molten salts. *J. Hazard. Mater.*, 213, 485-490.

Gaudin, A. M. 1939. *Principles of Mineral Dressing*. McGraw Hill Book Co., New York.

Ghosh, M., Sur, D., Basu, S., Baneryee, P. 2018. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, Elsevier Inc.

Guo, X., Liu, J., Qin, H., Liu, Y., Tian, Q., Li, D. 2015. Recovery of metal values from waste printed circuit boards using an alkali fusion-leaching-separation process. *Hydrometallurgy*, 156, 199-205.

Gupta, A., Yan, D. S. 2016. *Mineral Processing Design and Operations. An Introduction*. Elsevier.

Ha, V.H., Lee, J., Jeong, J., Haia, H. T., Jha, M. K. 2010. Thiosulphate leaching of gold from waste mobile phones. *J. Hazard. Mater.*, 178(1-3), 1115-1119.

Hagelüken, C., 2006. Recycling of electronic scrap at Umicore precious metals refining. *Acta Metall. Slovaca*, 12, 111-120.

He, J., Duan, C. 2017. Recovery of metallic concentrations from waste printed circuit boards via reverse floatation. *Waste Management*, 60, 618-628.

He, Y., Xu, Z. 2015. Recycling gold and copper from waste printed circuit boards using chlorination process. *RSC Adv.*, 5(12), 8957-8964.

İlankoon, I.M.S.K., Ghorbani, Y., Chong, M. N., Herath, G., Moya, T., Peterson, J. 2018. E-waste in the international context – A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and Technologies for value recovery. *Waste Management*, 82, 258-275.

İlyas, S., Lee, J., Chi, R. 2013. Bioleaching of metals from electronic scrap and its potential for commercial exploitation. *Hydrometallurgy*, 131-132, 138-143.



- Jadhav, U., Hocheng, H. 2015. Hydrometallurgical recovery of metals from large printed circuit board pieces. *Scientific Reports*, 5:14574.
- Kim, E., Kim, M., Lee, J., Pandey, B. D. 2011. Selective recovery of gold from waste mobile phone PCBs by hydrometallurgical process. *Journal of Hazardous Materials*, 198, 206-215.
- Kogan, V. 2006. Process for the recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical technique. International Patent, WO/2006/013568, (C22B 11/00), W.I.P. Organization.
- Kooroshy, J., Kortoweg, R., de Ridder, M. 2010. Rare Earth Elements and Strategic Mineral Policy, The Hague Centre for Strategic Studies and TNO, Report No: 2010.02, ISBN/EAN: 978-94-91040-7.
- Kumar, V., Lee, J., Jeong, J., Jha, M. K., Kim, B., Singh, R. 2015. Recycling of printed circuit boards (PCBs) to generate enriched rare metal concentrate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 805-813.
- Lee, J., Kim, Y., Lee, J. 2012. Disassembly and physical separation of electric/electronic components layered in printed circuit boards (PCB). *J. Hazard. Mater.*, 241, 387-394.
- Leirnes, J.,Lundstrom, M. 1983. Method for working-up metal-containing waste products. US Patent, US4415360 (C22B 1/00).
- Mecucci, A., Scott, K. 2002. Leaching and electromechanical recovery of copper, lead and tin from scrap printed circuit boards. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 77(4), 449-457.
- Messmann, L., Helbig, C., Thorenz, A., Tuma, A. 2019. Economic and environmental benefits of recovery networks for WEEE in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 222, 655-668
- Natarajan, G., Ting, Y. 2014. Pretreatment of e-waste and mutation of alkali-tolerant cyanogenic bacteria promote gold biorecovery. *Bioresource Technology*, 152, 80-85.
- Oguchi, M., Murakami, S., Sakanakura, H., Kida, A., Kameya, T. 2011. A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. *Waste Management*, 31, 2150-60.
- PACE Report on A New Circular Vision for Electronics – Time for a Global Reboot, January 2019
- Quinet, P., Proost, J., Van Lierde, A. 2005. Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes. *Miner. Metall. Process*, 22(1), 17-22.
- Robinson, B. H. 2009. E-wastes: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of the Total Environment*, 408, 183-191.
- Sheng, P. D., Etsell, T. H. 2007. Recovery of gold from computer circuit board scrap using aqua regia. *Waste Manage Res.*, 25(4), 380-383.
- Stuhlpfarrer, P., Luidold, S., Antrekowitsch, H. 2016. Recycling of waste printed circuit boards with simultaneous enrichment of special metals by using alkaline melts: a green and strategically advantageous solution. *J. Hazard. Mater.* 307, 17-25.
- Sun, Z., Xiao, Y., Agterhuis, H., Sietsma, J., Yang, Y. 2016. Recycling of metals from urban mines – a strategic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 112, (4), 2977-2987.
- Tripathi, A., Kumar, M., Sau, D. C., Agrawal, A., Chakravarty, S., Mankhand, T. R. 2012. Leaching of gold from the waste mobile phone printed circuit boards (PCBs) with ammonium thiosulphate. *Int. J. Metall. Eng.*, 1(2), 17-21.
- Veit, H. M., Moura Bernardes, A. 2015. *Electronic Waste Recycling Techniques*. Springer International Publishing.
- Veit, H. M., Bernardes, A. M., Ferreira, J. Z. 2006. Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. *J. Hazard. Mater.*, 137(3), 1704-1709.
- Veldhuizen, H., Sippel, B. 1994. Mining discarded electronics, *Ind. Environ.* 17 (3), 7-11.
- Wei, X., Liu, D., Huang, W., Huang, W., Lei, J. 2019. Simultaneously enhanced Cu bioleaching from E-wastes and recovered Cu ions by direct current electric field in a bioelectrical reactor. *Bioresource Technology*, <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122566>.
- Wills, B. A., Finch, J. A. 2016. *Wills' Mineral Processing Technology. An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 8th Edition Butterworth-Heinemann.
- Xiu, F. R., Chen, D. H., Huang, M. H. 2015. Leaching of Au, Ag, and Pd from waste printed circuit boards of mobile phone by iodide lixiviant after supercritical water pre-treatment. *Waste Manage.*, 41, 134-141.
- Zhang, S., Forssberg, E. 1997. Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap. *Resources, Conservation and Recycling*, 21, 247-269.
- Zhang, S., Forssberg, E. 1999. Intelligent liberation and classification of electronic scrap. *Powder Technology*, 105, 295-301.
- Zhu, N., Xiang, Y., Zhang, T., Wu, P., Dang, Z., Li, P., Wu, J. 2011. Bioleaching of metal concentrates of waste printed circuit boards by mixed culture of acidophilic bacteria, *Journal of Hazardous Materials*, 192, 614-619.
- Zuo, L., Wong, C., Corder, G. D., Sun, Q. 2019. Future trends and strategies of recycling high-tech from urban mines in China: 2015-2050. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 261-274.