



Orijinal Araştırma / Original Research

ATIK BASKILI DEVRE KARTLARININ EKONOMİK POTANSİYELİ VE ÇEVRESEL KARAKTERİZASYONU¹

ECONOMIC POTENTIAL AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISATION OF WASTE OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

Ersin Yener Yazıcı^{a,*}, Hacı Deveci^a

^a Hydromet B&PM Araştırma Grubu, Cevher-Kömür Haz. Anabilim dalı, Maden Müh. Böl., Karadeniz Teknik Üniversitesi, TRABZON

Kabul Tarihi / Accepted : 8 Ağustos / August 2016

ÖZET

Anahtar Sözcükler:

E-atık, geri dönüşüm/kazanım, liç, karakterizasyon

Atık elektrikli ve elektronik eşyalar (AEEE veya e-atık) zararlı organik ve inorganik maddeler içermektedir. Diğer taraftan AEEE, yüksek temel (özellikle Cu) ve değerli metal (Au, Ag ve Pd) içerikleri nedeniyle önemli bir ikincil kaynaktır. Bu atıkların uygun şekilde yönetilmemesi hem ekonomik kayıplara yol açmakta hem de evsel atıklarla birlikte depolanması durumunda çevre kirliliğine neden olabilmektedir. AEEE'deki ağır ve değerli metallerin önemli bölümü atık baskılı devre kartlarında (ABDK) bulunmaktadır. Bu çalışmada, ABDK'nın temel ve değerli metal içeriğine bağlı olarak ekonomik potansiyeli ortaya konulmuştur. Ayrıca, atık bilgisayarlardan toplanan ABDK'ya (%18,5 Cu, 86 g/t Au, 694 g/t Ag ve 97 g/t Pd) çevresel karakterizasyon testleri uygulanmıştır. TCLP testi (Toxic Characteristic Leaching Procedure) sonuçlarına göre ABDK, yüksek kurşun (Pb) salınımı nedeniyle "zararlı atık" sınıfındadır. SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) ve EN 12457-2 (European Standard Leaching Test) testlerinde de bazı metallerin (Ba/Al/Pb/Cu) yüksek salınım gösterdiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, AEEE yönetiminde atık depolama yerine geri dönüşüm/kazanım süreçleri ile metallerin kazanılmasının en uygun çözüm olduğunu göstermektedir.

ABSTRACT

Keywords:

E-waste, recycling/recovering, leaching, characterization

Waste electrical and electronic equipments (WEEE or e-waste) contain hazardous organic and inorganic substances. On the other hand, WEEE is an important secondary resource due to its base (mainly Cu) and precious metals (Au, Ag and Pd) content. Improper management of this waste stream leads to economic losses as well as environmental pollution if disposed in landfills with municipal wastes. The major part of heavy and precious metals in WEEE is present in waste of printed circuit boards (WPCB). This study highlights the economic potential of WPCB with regards to its base and precious metal content. In addition, environmental characterisation procedures were tested using WPCB (18.5% Cu, 86 g/t Au, 694 g/t Ag and 97 g/t Pd) collected from obsolete computers. TCLP test (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) results showed that WPCB should be classified as "hazardous waste" due to high lead (Pb) concentration in the leachate. In the SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) and EN 12457-2 (European Standard Leaching Test) tests, some metals (Ba/Al/Pb/Cu) also determined to be highly solubilised. These results indicated that recovery of metals from WEEE through recycling/recovery processes is the most suitable route for proper management compared with disposing these wastes in landfills.

¹ Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi (IMCET 2015) bildiriler kitabında yayınlanmıştır.

* eyazici@ktu.edu.tr

1. ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYALARIN (AEEE) EKONOMİK POTANSİYELİ

Özellikle son yıllarda, artan çevresel kaygılara ve doğal kaynakların hızla tükenmesine bağlı olarak atıkların, çevresel etkisi en düşük ve ekonomik yönden en yüksek fayda sağlayacak şekilde yönetimi giderek daha da önem kazanmaktadır. Atık elektrikli ve elektronik eşyalar (AEEE veya e-atık), atıl duruma gelen ve/veya kullanım ömrü dolan elektrikli ve elektronik eşyaların (TV, bilgisayar, yazıcı, baskılı devre kartları vs.) ürün sahipleri tarafından hurdaya ayrılması ile ortaya çıkan ve %3-5 büyüme hızıyla Avrupa'da en hızlı büyüyen atık türüdür (Bertram vd., 2002; EC, 2006).

AEEE, içerdiği temel ve değerli metaller ile önemli bir ekonomik potansiyele sahiptir. Farklı AEEE türlerinin metal içerikleri ve metal fiyatları göz önüne alınarak yapılan değerlendirmeler AEEE'nin ekonomik değerinin önemli bölümünü değerli metaller (Ag, Au ve Pd) ve ikinci olarak da bakır (Cu) oluşturduğunu ortaya koymuştur (Yazıcı, 2012; Tuncuk vd., 2012). AEEE'nin içerdiği metal (Cu, Fe, Ni vb.) ve özellikle değerli metallerin (Au, Ag, Pd vb.) önemli bölümü baskılı devre kartlarında bulunmaktadır (Goosey ve Kellner, 2002). Çizelge 1'de atık baskılı devre kartlarının (ABDK) içerdiği malzemeler ve tipik oranları sunulmuştur. Farklı ABDK türlerinin temel ve değerli metal içerikleri Çizelge 2'de görülmektedir. Buna göre (Çizelge 1 ve 2), cevherler ile kıyaslandığında ABDK genel olarak daha yüksek oranda temel ve değerli metal içermektedir. ABDK'nın altın içeriğine göre sınıflandırılması Çizelge 3'de sunulmuştur. ABDK'nın altın içeriği arttıkça ekonomik değeri de yükselmektedir. Altın içeriği 400 g/ton'dan fazla ise "çok yüksek", 50 g/ton'dan düşük ise "çok düşük" olarak sınıflandırılmaktadır. ABDK'daki altın, devre kartı üzerindeki yarı iletken, pin ve konnektörlerde bulunmaktadır (WRAP, 2014). Ancak, yüksek maliyetleri sebebiyle baskılı devre kartlarında daha az oranda değerli metal kullanmaya yönelik araştırmalar sürmektedir (Goosey ve Kellner, 2002). Eski nesil kişisel bilgisayarların (PC) altın içeriği, bilgisayar başına 4 g Au'dan 1 g'a gerilemiştir (Widmer vd., 2005).

Çizelge 1. ABDK'nın içerdiği malzemeler ve tipik oranları (Namias, 2013).

Malzeme	Miktar (%)
Fiberglas	45-50
Bakır	15-20
Bileşenler / Entegre devreler	10-25
Değerli metaller	0,4
Pb,Sn,diğer baz metaller	≈5-30

Çizelge 2. Farklı ABDK türlerinin metal içerikleri (Hagelüken, 2006a; Deveci vd., 2010; Yazıcı ve Deveci, 2009).

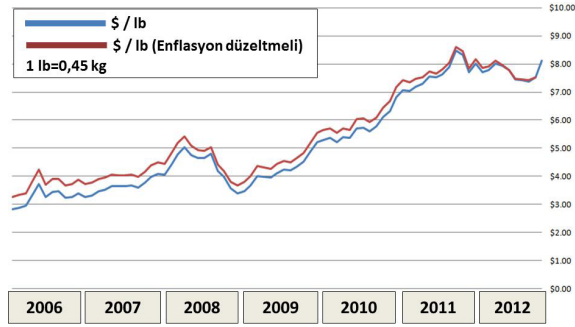
ABDK türü	Fe	Cu	Al	Pb	Ni	Sn	Ag	Au	Pd
	%					g/ton			
ABDK-PC(1)	7	20	5	1,5	1	2,9	1000	250	110
ABDK-PC(2)	3,6	15,5	4,9	3,9	0,2	4,3	380	6	0
ABDK-TV(1)	28	10	10	1	0,3	1,4	280	20	10
ABDK-TV(2)	0,04	9,2	0,75	0,003	0,01	0,72	86	3	3,7
Cevher	25	0,5	30	5	0,5	0,5	200	1	-

Çizelge 3. ABDK'nın altın içeriğine göre sınıflandırılması (Hagelüken, 2006b; Umicore, 2015).

İçerik/Sınıf	Altın (g/ton)	ABDK türü
Çok yüksek	>400	Ana sunuculardaki devre kartları, bazı cep telefonları vb.
Yüksek	200-400	PC kartları, bazı cep telefonları vb.
Orta	100-200	
Düşük	50-100	TV kartları, monitör kartları, hesap makineleri vb.
Çok düşük	<50	

Baskılı devre kartlarının altın içeriğinin azalmasına karşın metal fiyatlarına bağlı olarak ABDK'nın ekonomik değeri yükselme eğilimindedir (Şekil 1), ancak Eylül 2011'den itibaren fiyatlar daha istikrarlı seyretmektedir. Mayıs 2012'de ekonomik değeri yaklaşık 18 \$/kg ABDK'dır (42 TL/kg, 05.01.2015 kuruna göre). Şekil 1'deki veriler "orta sınıf" PC kartlarının metal içeriklerine göre hesaplanmış net değerlerdir. Geri kazanım süreci ile ilgili herhangi bir faaliyete ait (metal ekstraksiyonu, nakliye, örnekleme, analiz, ergitme, rafinasyon, proses kayıpları, yatırım geri dönüşü

ve Be/Bi/Ni gibi elementler için cezalar) maliyetleri kapsamamaktadır.



Şekil 1. Baskılı devre kartlarının yıllara göre ekonomik değeri (Resource Recycling, 2015).

1.1. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Çevresel Etkisi ve Yasal Düzenlemeler

AEEE'nin zararlı organik (alev geciktiriciler vb.) ve inorganik (Hg, Pb vb.) maddelerin yanı sıra ekonomik değeri yüksek temel (özellikle Cu) ve değerli metaller (Ag, Au ve Pd gibi) içermesi nedeniyle doğrudan bu atıkların yönetimini düzenleyen yasal düzenlemeler yapılmaktadır. Evsel atıklarla depolanarak bertaraf edilen AEEE'nin Hg, Cd ve Pb kirliliğine neden olduğu bildirilmiştir (Öztürk ve Ayberk, 2008; Widmer vd., 2005). Fishbein (2002), ABD'deki evsel atıklar içindeki kurşun kirliliğinin ikinci büyük kaynağının ABDK olduğunu bildirmiştir. Toprak kirliliğinin yanı sıra, AEEE'deki ağır metaller, yağmur sularının etkisiyle çözünerek yeraltı ve yüzey sularının da kirlenmesine sebep olabilmektedir (Kaya ve Sözeri, 2007; Öztürk ve Ayberk, 2008; Widmer vd., 2005).

AEEE'lerin çevresel zararlarını azaltmak amacıyla Avrupa Komisyonu, yayınladığı 2002/95/EC sayılı "Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS) (Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılması)" yönergesiyle elektrikli ve elektronik eşyaların üretim sürecinde altı madde (Pb, Cd, Hg, Cr(VI), polibromürlü bifenil ve polibromürlü difenil eter) kullanımını kısıtlamıştır (EC, 2003a). Bu yönerge, son olarak 2011/65/EU sayılı yönerge ile güncellenmiştir (EU, 2011). Avrupa Komisyonu, 2003 yılından itibaren yürürlükte olan "Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) (2002/96/EC sayılı, Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar)" yönergesini (EC, 2003b)

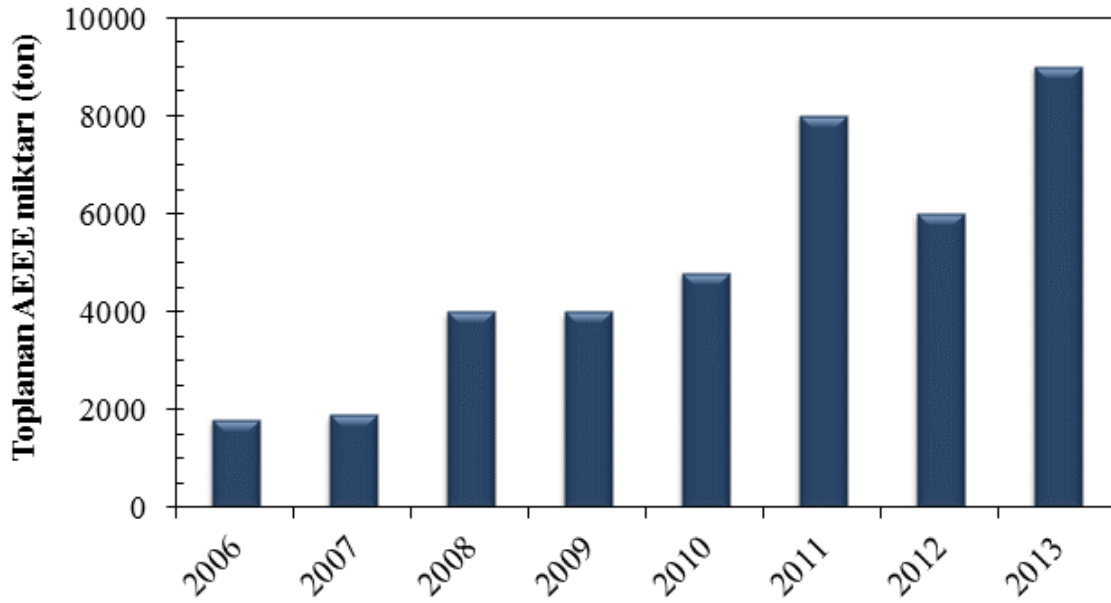
2012/19/EU sayılı yönerge ile güncellenmiştir (EU, 2012). Ancak, bütün çalışmalara rağmen, AEEE'nin geri dönüşüm oranı henüz düşük seviyelerdedir. Büyük bir kısım (%80-85) atık depolama alanlarına depolanmaktadır (Babu vd., 2007; Hadi vd., 2015). İngiltere'de ABDK'nın (50.000 ton/yıl) sadece %15'i geri kazanım işlemlerine tabi tutulmaktadır (Goosey ve Kellner, 2002).

Avrupa Birliği'nin yönergeleriyle uyumlu olarak, Ülkemizde de T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından öncelikle "Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılmasına Dair Yönetmelik" 30.05.2008 tarihinde yayımlanmış ve 30.05.2009 tarihinde yürürlüğe konulmuştur (Resmi Gazete, 2008). Ancak, söz konusu yönetmelik (Resmi Gazete, 2008) 22.05.2012 tarihinde yayımlanan "Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği" ile yürürlükten kaldırılmıştır (Resmi Gazete, 2012). Bu yönetmeliğe göre belediyelerin yükümlü olduğu temel konular şunlardır:

- AEEE'lerin etkin bir biçimde diğer atıklardan ayrı toplanmasını sağlamak,
- Yönetmelikte belirtilen hedeflere uygun olarak toplama merkezleri kurarak AEEE'lerin toplanmasını sağlamak ve kurulan getirme merkezlere ilişkin olarak halkı bilgilendirmek,
- Toplanan evsel AEEE'leri işleme tesislerine göndermek.

Aynı yönetmeliğe göre elektrikli ve elektronik eşya (EEE) üreticilerinin sorumlu olduğu bazı maddeler ise aşağıda sıralanmıştır:

- Üreticiler EEE'lerin üretim, ürün temini, ürün geliştirme, AR-GE ve tasarım faaliyetlerinde yönetmelik kapsamındaki zararlı maddelerin kullanımından kaçınmak veya alternatif maddeleri kullanmak için gerekli çalışmalarını yapmak,
- Yönetmelikte belirtilen geri dönüşüm ve geri kazanım oranlarının sağlanması ve atıkların azaltılması amacıyla, EEE'lerin tasarımı ve üretimi sırasında, ürünlerin kolayca parçalanmasını, ayrıştırılmasını, yeniden kullanımını, geri dönüşümünü ve geri kazanımını kolaylaştıracak malzeme ve parçaları kullanmak,
- Belediyeler ve dağıtıcılar tarafından toplanan evsel AEEE'lerin; toplama merkezlerinden veya dağıtıcılardan başlamak üzere nakliye maliyetlerini karşılamak, lisanlı tesislerde işlenmesini sağlamak, işleme imkânının bulun-



Şekil 2. Ülkemizde 2006-2013 yılları arasında toplanan AEEE miktarı (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015).

maması durumunda bertarafı için bir sistem kurmak ve maliyetleri karşılamak,

- Evsel olmayan AEEE'lerin toplanması, işlenmesi ve bertaraf edilmesi amacıyla bir sistem kurmak.

Ülkemizde yıllara göre (2006-2013) toplanan AEEE miktarı Şekil 2'de sunulmuştur. Buna göre, 2006-2013 yılları arasında toplanan AEEE miktarı 1800 ton'dan 9000 ton'a yükselmiştir (Şekil 2). Ülkemizdeki toplanan AEEE'lerin yönetimi genel olarak atıkların toplanması, temel bileşenlerine ayrıştırılması ve ekonomik değeri yüksek malzemelerin (ABDK gibi) yurt dışına ihracını kapsamaktadır. Ülkemizde AEEE geri dönüşüm oranının halen %1-2 gibi çok daha düşük seviyelerde olduğu belirtilmiştir (Kartal, 2015). Bu çalışmada, ABDK'nın "zararlı atık" durumunu ortaya koymak ve bu atıkların evsel atıklarla depolanması durumunda yeraltı/yerüstü su kaynaklarının kirliliğine neden olabilecek zararlı metalleri belirlemek amacıyla ABDK'ya standart karakterizasyon testleri uygulanmıştır.

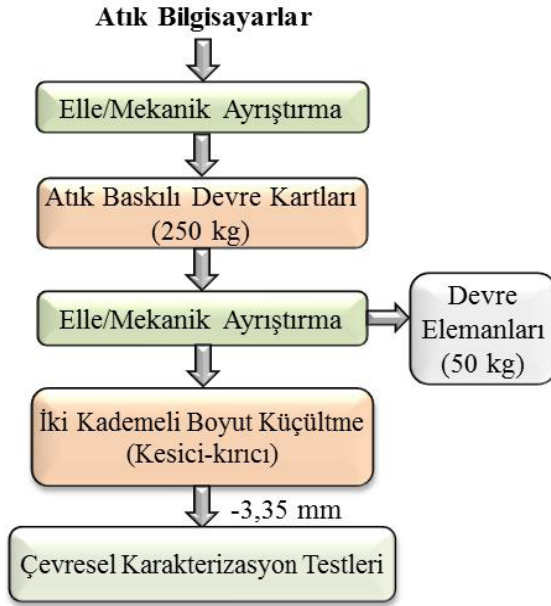
2. MALZEME VE YÖNTEM

Atıl duruma gelmiş ve depolanmış olarak bulunan atık bilgisayar, monitör, modem vb. elektronik cihazlardan el ve gerekli yardımcı aletler (tornavida, keski vb.) yardımıyla sökülerek ~250 kg ABDK toplanmıştır. Daha sonra, toplanan ABDK üzerinde bulunan kolayca sökülebilir devre elemanları ayrıştırılmıştır (Şekil 3a). Bileşenleri ayrıştırılmış ABDK (~200 kg), dört bıçaklı bir döner

kesici-kırıcı (rotary cutting shredder) kullanılarak, iki kademeli boyut küçültme işlemine tabi tutulmuştur. ABDK, birinci kademede -8 mm, ikinci kademede -3,35 mm tane boyutuna ufaltılmıştır (Şekil 3b). Deneysel çalışmalarda uygulanan akım şeması Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 3. (a) Baskılı devre kartları ayrılmış AEEE; (b) İki kademeli boyut küçültme uygulanmış ABDK (-3,35 mm)



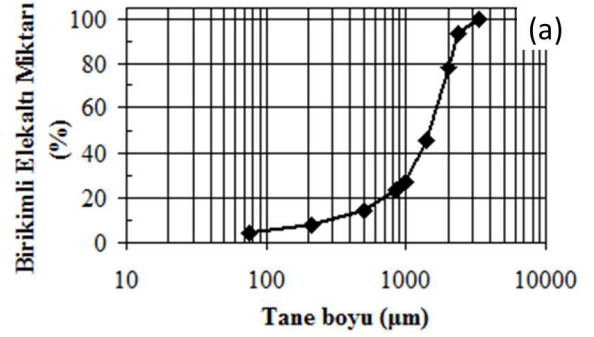
Şekil 4. Uygulanan akım şeması.

2.1. Fiziksel ve Kimyasal Karakterizasyon

Boyut küçültmeye tabi tutulmuş ABDK'nın (-3,35 mm) tane boyut dağılımını belirlemek amacıyla elek analizi yapılmıştır (Şekil 5). Eleme işlemi, standart ASTM elekleri kullanılarak kuru olarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre, ABDK'nın %80'i 2,1 mm (d_{80}) ve %27'si 1 mm'nin altındadır. ABDK'nın metal içerikleri Çizelge 4'de sunulmuştur. XRD analizi, ABDK'daki kurşun ve kalayın bir bölümünün alaşım (lehim) halinde bulunduğunu doğrulamıştır (Şekil 6).

2.2. Çevresel Karakterizasyon

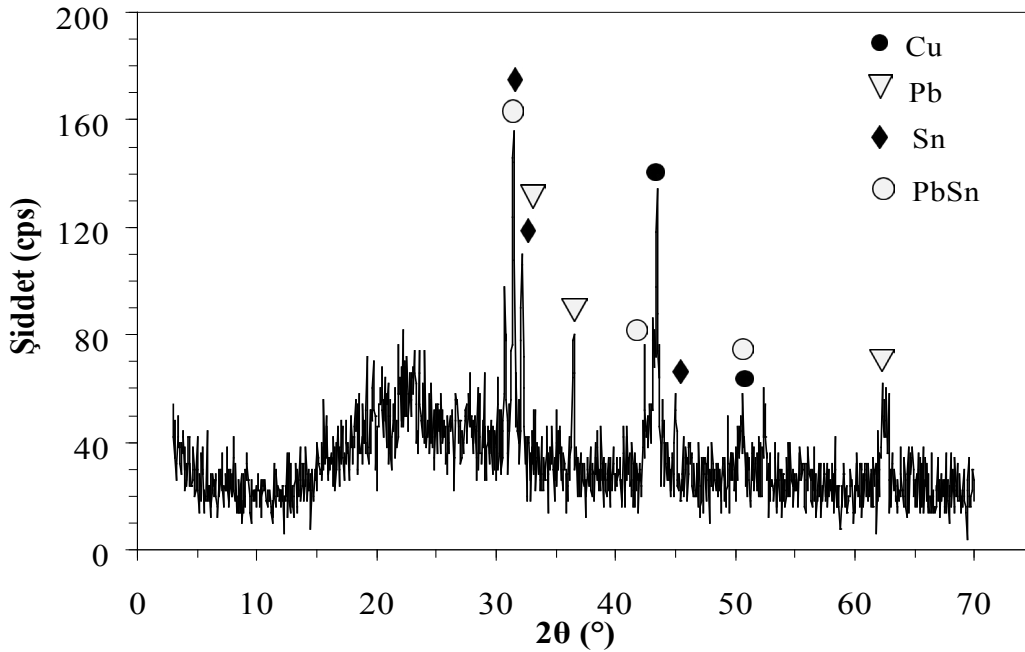
Atıkların çevresel açıdan karakterizasyonu için TCLP (Toxic Characteristic Leaching Procedure), SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) ve EN 12457-2 testleri uygulanmıştır. USEPA (Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı) tarafından geliştirilen TCLP, AEEE dahil olmak üzere birçok atık malzemenin farklı metallerden kaynaklanan çevresel etkilerini belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu test, katı atıkların "zararlı atık" sınıfına ait olup olmadığını belirlemek için tercih edilmektedir (Townsend, 2002). SPLP (USEPA testi) ve EN 12457-2 (Determination of Leachability by Water) sırasıyla asidik yağmur suyu ve su etkisi altında atıklardan zararlı bileşenlerin salınımını öngören testlerdir (Townsend, 2002; EC, 2003c; Townsend vd., 2003).



Şekil 5. (a) ABDK'nın (-3,35 mm) tane boyut dağılımı, (b) -3,35+2,36 mm fraksiyonuna ait stereomikroskop görüntüsü

Çizelge 4. ABDK'nın kimyasal analizi

Metal	İçerik
Cu (%)	18,5
Fe (%)	2,05
Al (%)	1,33
Pb (%)	2,66
Ni (%)	0,43
Sn (%)	4,91
Au (g/ton)	86
Ag (g/ton)	694
Pd (g/ton)	97



Şekil 6. ABDK'nın X-ışını difraksiyonu (XRD) profili

Avrupa Birliği tarafından standart kabul edilen EN 12457-2 (European Standard Leaching Test) testinde ekstraksiyon çözeltisi olarak saf su kullanılmaktadır. Uygulanan testler ve koşulları Çizelge 5'de sunulmuştur. Analizler, İndüktif eşleşmiş plazma-atomik emisyon spektrometresi (ICP-AES, Spectro Genesis) ile yapılmıştır.

2.2.1. TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) Testi

TCLP testi -9,5 mm boyutlu malzemelere uygulanır. Bu çalışmada, -3,35 mm boyutundaki ABDK kullanılmıştır. Bu testlerde kullanılacak ekstraksiyon çözeltisi (extraction fluid) standart prosedüre uygun olarak hazırlanmıştır (USEPA, 1997). Testlerde, ekstraksiyon çözeltisi-1 (1 litrede 5,7 mL asetik asit ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OOH}$) ve 64,3 mL 1 N NaOH; pH $4,93 \pm 0,05$) kullanılmıştır. Sıvı:kati oranı 20:1 olacak şekilde kati malzeme (10 g) ve ekstraksiyon çözeltisi-1 (200 mL) polipropilen (PP) kapaklı şişelere ilave edilmiştir. Şişelerin kapakları sıkıca kapatıldıktan sonra şişeler 30 dev/dk hızda 18 saat süreyle karıştırmaya tabi tutulmuştur (Şekil 7). Karıştırma süresi sonun-

da, sıvı kısım filtrasyon (0,8 μm selülöz nitrat filtre, Sartorius) ile ayrılmıştır. Berrak çözültiden 50 mL alınmış ve 1 N HNO_3 ilave edilerek <pH 2'ye ayarlanmıştır. Çözültiden metal analizleri yapıncaya kadar örnekler buzdolabında (4°C) saklanmıştır. Testler iki tekrarlı yapılmış olup sonuçların ortalaması sunulmuştur.



Şekil 7. Çevresel karakterizasyon testlerinde kullanılan deney düzeneği

Çizelge 5. Uygulanan çevresel karakterizasyon testleri ve koşulları

Yöntem	Ekstraksiyon çözeltisi	pH	Tane boyutu (mm)	Sıvı: Kati oranı
TCLP	Asetik asit/Sodyum hidroksit	$4,93 \pm 0,05$	<9,5 mm	20:1
SPLP	Sülfürik ve nitrik asit	$4,20 \pm 0,05$	<9,5 mm	20:1
EN 12457-2	Saf su	$\sim 7,0$	<4 mm	10:1

2.2.2 SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) Testi

SPLP testinde kullanılacak ekstraksiyon çözeltilisi, ağırlıkça 60:40 oranında $H_2SO_4:HNO_3$ karışımının saf suya pH $4,20 \pm 0,05$ olacak şekilde ilave edilmesiyle hazırlanmıştır (USEPA, 1997). SPLP testlerinde, TCLP testlerinde verilen prosedür (Bölüm 2.2.1) uygulanmıştır. SPLP testi sonuçları, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde (Resmi Gazete, 2004) belirtilen su kalite sınıflarına göre değerlendirilmiştir.

2.2.3. EN 12457-2 (European Standard Leaching Test) testi

Bu testte ekstraksiyon çözeltilisi olarak saf su kullanılmış ve sıvı:kati oranı 10:1 olacak şekilde ayarlanmıştır. Diğer testlerde kullanılan düzenek (Şekil 4) kullanılmış, polipropilen (PP) şişeler (iki tekrarlı) 30 dev/dk hızda 24 saat süreyle karıştırılmıştır. Karıştırma işleminden sonra uygulanan prosedür TCLP testi ile aynıdır. Sonuçlar, EN 12457-2 sınır değerlerine göre değerlendirilmiştir (EC, 2003b).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

TCLP testine ait sekiz metalin (Ag, As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb ve Se) salınımları Çizelge 6'da sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, sadece kurşun (Pb) salınımının test için verilen sınır değerlerin üzerinde (≈ 92 kat) olduğu bulunmuştur (Çizelge 6). Diğer metallerde de bir miktar salınım gözlenmiş, ancak, derişimler sınır değerlerin altında kalmıştır. Buna göre ABDK, yüksek kurşun (Pb) salınımı nedeniyle "zararlı atık" konumundadır.

Çizelge 6. TCLP testi sonuçları

Element	Derişim (ppb)	TCLP için sınır değerler (ppb) ^a
Ag	- [*]	5000
As	21,2	5000
Ba	3647	100000
Cd	30,7	1000
Cr	13	5000
Hg	1,52	200
Pb	458611	5000
Se	- [*]	1000
Son pH	5,07	

^aUSEPA, 1997^{*} Tayin sınırının altında

Benzer bir çalışmada, Yang (1993), TCLP testi-ne göre, TV devre kartlarının ve bazı ekran tüplerinin (CRT) Pb, Zn ve Cd metalleri yönünden zararlı atık sınıfına girdiğini bulmuştur. McPherson (2005), çeşitli atık bilgisayar parçalarının (anakart, ses kartı, video kartı vb.), yüksek metal (Pb, Ag, Ba, Cd ve Cr) salınımlarına sahip olduğu için (TCLP) zararlı atık olarak değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Li vd. (2006), kişisel bilgisayar parçalarını (anakart, işlemci, entegre devre vb.) kullanarak TCLP testi uygulamış ve kurşun (Pb) salınımının yasal sınırdan (5 mg/L) 30-100 kat daha fazla olduğunu bulmuştur. Yazıcı vd. (2010), elemanlı ABDK kullandığı TCLP testinde, Pb salınımının yasal sınıra göre ≈ 41 kat daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Görüldüğü gibi, birçok araştırmada, ABDK'nın (ve genel olarak AEEE'nin) zararlı atık sınıfına girdiği belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda özellikle Pb salınımının diğer metallerle göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Kurşunun temel kaynağı, ABDK'da kullanılan kurşunlu lehimdir (elektronikte Sn/Pb=63/37) (Townsend, 2002). Townsend vd. (2008), kurşun içeren (Sn-Pb) ve içermeyen (Sn-Bi-Ag, Sn-Ag-Cu, Sn-Bi-Cu ve Sn-Cu) lehimlerin kullanıldığı farklı devre kartlarına SPLP testi uygulamış ve Pb içermeyen lehimlerin kullanıldığı kartların Pb-lehimli kartlara göre daha yüksek (3,8-71 kat) Cu salınımına sahip olduğunu bildirmiştir.

EN 12457-2 testlerinde sınır değerlerden daha yüksek Ba, Cu ve Pb salınımları kaydedilmiştir (Çizelge 8). Bu testte ekstraksiyon çözeltilisi olarak saf su kullanılmaktadır. Bu sonuçlara göre (Çizelge 8), oksitleyici olmayan koşullar altında dahi önemli oranda metal salınımı gerçekleşmektedir. Yazıcı vd. (2010), devre elemanlı ABDK'da aynı metallerin (Ba, Cu ve Pb) sınır değeri aştığını belirtmiştir.

Çizelge 7. SPLP testi sonuçları ve su kalite sınıfları

Element	Derişim (ppb)	Su Kalite Sınıfları (ppb)		
		I ^a	II ^b	IV ^c
Ag	- *	-	-	-
Al	1137	300	300	>1
As	13,7	20	50	>100
Ba	501	1000	2000	>2000
Cd	- *	3	5	>10
Cr	- *	20	50	>200
Cu	37,1	20	50	>200
Co	2,4	10	20	>200
Fe	8,9	300	1000	>5000
Hg	- *	0,1	0,5	>2
Ni	- *	20	50	>200
Pb	124	10	20	>50
Se	- *	10	10	>20
Son pH	8,51			

^a Yüksek kaliteli su; ^b Az kirlenmiş su; ^c Çok kirlenmiş su (Resmî Gazete, 2004) *Tayin sınırının altında

Çizelge 8. EN12457-2 testi sonuçları ve sınır değerler

Element	Derişim (ppb)	Sınır değerler (ppb) ^a
Ag	- *	-
Al	3213	-
As	- *	25
Ba	610	300
Cd	- *	5
Cr	- *	70
Cu	104	100
Co	- *	-
Fe	- *	-
Hg	- *	2
Ni	7,4	40
Pb	175	50
Se	- *	7
Son pH	8,54	

^a EC, 2003c *Tayin sınırının altında

ABDK'dan metallerin yüksek salınımı, AEEE yönetiminde atık depolamanın önemli seviyede çevresel kirliliğe neden olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, hem ekonomik hem de çevresel açıdan en uygun atık yönetimi seçeneğinin geri dönüşüm/kazanım olduğu sonucuna varılmaktadır.

SONUÇ

Atık elektrikli ve elektronik eşyaların (AEEE veya e-atık) zararlı organik/inorganik maddeler içermesi, diğer taraftan temel/değerli metal yönünden zengin olmaları nedeniyle en uygun şekilde yönetilmeleri hem ekonomik açıdan hem de çevresel açıdan önem arz etmektedir. AEEE'deki temel ve değerli metallerin önemli bölümü atık baskılı devre kartlarında (ABDK) bulunmaktadır. ABDK'nın ekonomik değeri özellikle altın içeriğinin artmasına bağlı olarak yükseltmektedir.

AEEE'nin evsel atıklarla depolanması durumunda yeraltı/yerüstü sularının kirlenmesi söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle, atıl duruma gelen bilgisayarlardan toplanan ABDK'nın (%18,5 Cu, 86 g/t Au, 694 g/t Ag ve 97 g/t Pd) çevresel etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla standart test prosedürleri uygulanmıştır. TCLP testinde kurşun (Pb) salınımının sınır değerlerin ≈92 kat üzerinde olduğu, bu nedenle ABDK'nın, yüksek kurşun (Pb) salınımı nedeniyle "zararlı atık" sınıfında olduğu belirlenmiştir. SPLP testinde sınır değerleri aşan metaller Al, Pb ve Cu olarak belirlenmiştir. Ekstraksiyon çözültisi olarak saf su kullanılan EN 12457-2 testlerinde (oksitleyici olmayan koşullar) sınır Ba, Cu ve Pb metallerinin yüksek salınım gösterdiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, AEEE yönetiminde atık depolamanın su kirliliğine neden olabileceğini ve buna dayanarak AEEE'nin geri dönüşüm/kazanım

süreçleriyle değerlendirilmesinin en uygun seçeneği olduğu ortaya çıkmaktadır.

TEŞEKKÜR

Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a (109M111 no'lu proje) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Babu, B.R., Parande, A. K. ve Basha, C. A., 2007. Electrical and electronic waste: a global environmental problem, *Waste Management & Research*, 25, 4, 307-318.

Bertram, M., Graedel, T. E., Rechberger, H., Spataro, S., 2002. The contemporary european copper cycle: waste management subsystem, *Ecological Economics*, 42, 1-2, 43-57.

Deveci, H, Yazıcı, E. Y., Aydın, U., Yazıcı, R. ve Akçil, A.U., 2010. Extraction of copper from scrap TV boards by sulphuric acid leaching under oxidising conditions, *Going Green-CARE INNOVATION*, no: 045, Viyana.

EC, 2003a. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS). Official Journal L 037.

EC, 2003b. Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE), Joint Declaration of the European Parliament, The Council and the Commission Relating to Article 9, Official Journal L 037.

EC, 2003c. European Council decision establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills, 2003/33/EC, L 11/27.

EC, 2006. Implementation of waste electric and electronic equipment directive in EU 25. European Commission (EC), Directorate-General Joint Research Center, Institute for Prospective Technological Studies, Technical Report Series, Ed.: Savage, M., Ogilvie, S., Slezak, J., Artim, E.

EU, 2011. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS) (güncelleme), Official Journal L 174.

EU, 2012. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (güncelleme). Official Journal L 197.

Fishbein, F.K., 2002. Waste in the Wireless World:

The challenge of cell phones. INFORM Inc., Mayıs, 103 s.

Goosey, M., Kellner, R., 2002. A scoping study: end-of-life printed circuit boards, Intellect and the Department of Trade and Industry, 10 s.

Hadi, Pejman, Meng Xu, Carol S. K. Lin, Chi-Wai Hui, Gordon McKay. 2015. Waste Printed Circuit Board Recycling Techniques and Product Utilization, *J. of Hazard. Mater.*, 283, 234-243.

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

Hagelüken, C., 2006a. Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling - a holistic approach for interface optimisation between pre-processing and integrated metals smelting and refining, International Symposium on Electronics and the Environment (ISEE), USA, 218-223.

Kartal, A., 2015. Atık elektrikli ve elektronik eşyaların belediyelerde toplanması ve uygulamaları, Atık Yönetimi Sempozyumu, 26-29 Ocak.

Kaya, M. ve Sözeri, A., 2007. Elektronik Atık (E-Atık) Geri Dönüşümü/Kazanımı, *AB Sürecinde Türkiye'de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu (TÜRKAY)*, Mayıs, İstanbul.

McPherson, D. T., 2005. Hazard Assessment of E-Waste From Desktop Computers, Doktora Tezi, Jackson State University, USA.

Namias, J. 2013. The Future of Electronic Waste Recycling in the United States: Obstacles and Domestic Solutions. MSc Thesis, Columbia University.

Öztürk, T., Ayberk, S., 2008. E-atıkların genel atık profili içindeki yerinin belirlenmesi, *Çevre Sorunları Sempozyumu*, 564-568, Kocaeli.

Resmi Gazete, 2004. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Karar: 2004/8289, Sayı: 25687.

Resmi Gazete, 2008. Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlanmasına Dair Yönetmelik, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sayı: 26981.

Resmi Gazete, 2012. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sayı: 28300.

Resource Recycling. 2015. Printed Circuit Board Prices Tumble. [Http://resource-recycling.com/node/2813](http://resource-recycling.com/node/2813).

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015. Türkiye'de Atık Yönetimi, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Atık Yönetimi Sempozyumu, Ocak.

Townsend, T G., Jang, Y-C. ve Tolaymat, T., 2003.

A guide to to use of leaching tests in solid waste management decision making, The Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management (University of Florida, USA) için hazırlanmış rapor, 03-01 (A), 31 s.

Townsend, T., Musson, S., Dubey, B. ve Pearson, B., 2008. Leachability of printed wire boards containing leaded and lead-free solder, *Journal of Environmental Management*, 88, 4, 926–931.

Townsend, T.G., 2002. Evaluation of Leaching Test Results of Lead-Free Solders, Abt. Associates Inc. için hazırlanmış rapor, 10 s.

Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A. Yazıcı, E.Y., Deveci, H., 2012. 'Aqueous Metal Recovery Techniques from E-Scrap: Hydrometallurgy in Recycling'. *Minerals Engineering* 25,1, 28–37.

Umicore. 2015. Electronic Scrap- Materials We Treat, <http://www.preciousmetals.umicore.com/recyclables/eScrap/MaterialsWeTreat/>.

USEPA, 1997. Test Methods for evaluating solid waste - physical chemical methods. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, www.epa.gov/SW-846/main.htm.

Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M. ve Böni, H., 2005. Global perspectives on e-waste, *Environmental Impact Assessment Review*, 25, 5, 436–458.

WRAP, 2014. Techniques for Recovering Printed Circuit Boards (PCBs). by H.McCoach, C.White, C.Laundon, IMT002-016. Waste&Resources Action Programme (WRAP), 45 s.

Yang, G. C. C., 1993. Environmental threats of discarded picture tubes and printed circuit board, *Journal of Hazardous Materials*, 34,2, 235–243.

Yazıcı, E. Y. 2012. Elektronik Atıklardan Metallerin Fiziksel ve Hidrometalurjik Yöntemlerle Geri Kazanımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Yazıcı, E. Y., Deveci, H., 2009. E-atıklardan Metallerin Geri Kazanımı, *Madencilik*, 48, 3–18.

Yazıcı, E. Y., Deveci, H., Alp, I., Akcil, A.U. ve Yazıcı, R., 2010. Characterisation of computer printed circuit boards for hazardous properties and beneficiation studies, Int. Mineral Processing Congress (IMPC), 4009-401, Avustralya.