



Orijinal Araştırma / Original Research

BASKI DEVRE KARTLARINDAKİ DEĞERLİ METALLERİN CEVHER ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ İLE KAZANIMI

CONCENTRATION OF VALUABLE METALS FROM PRINTED CIRCUIT BOARDS USING MINERAL PROCESSING METHODS

Esra Tanısalı^{a,*}, Mustafa Özer^{a,**}, Fırat Burat^{a,***}

^a İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, Geri Kazanım, Ayırma ve Zenginleştirme Çalışma Grubu, 34469, İstanbul,

Geliş Tarihi / Received : 21 Ağustos / August 2019

Kabul Tarihi / Accepted : 06 Nisan / April 2019

Anahtar Sözcükler:

Geri kazanım,
Değerli metaller,
Baskı devre kartı,
Cevher hazırlama.

ÖZ

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte elektronik ürün çeşitliliği ve üretimi artmaktadır. Artan tüketim ile birlikte kullanılmayan ürün miktarı çoğalmakta ve bu ürünler hurda olarak atığa ayrılmaktadır. Elektronik atık olarak adlandırılan bu hurdalar, içerdikleri zararlı element ve bileşenler yüzünden çevre ve canlılar üzerinde hasarlara neden olmaktadır. İçerisindeki zararlı bileşenlerin yanı sıra, değerli metalleri bünyelerinde barındırmaları ve bu metallerin içeriklerinin doğal kaynaklara oranla çok yüksek olması elektronik atıklardan metal geri kazanımını cazip kılmaktadır. Elektronik atıkların %3'ünü oluşturan baskı devre kartları (BDK), yüksek Cu, Au ve Ag içerikleri ile dikkat çekmektedir. Bu çalışma kapsamında, BDK'da yüksek içeriklerde bulunan Cu, Au, Ag'nin kazanımı için boyut küçültme işlemleri uygulanmış, -2 , +0,5 ve -0,5 mm boyut gruplarına sınıflandırılan malzemeler özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme işleminin yapıldığı sarsıntılı masaya beslenmiştir. Zenginleştirme işlemleri sonucunda beslemeye göre ağırlıkça %62 oranında bir nihai konsantrasyonla, %88,2 Au, %95,3 Cu ve % 93,6 Ag kazanım verimleri ile elde edilmiştir.

ABSTRACT

With the developing technology in recent years, the variety and production of electronic products has increased rapidly. The amount of unused products increases with high consumption rate, these products are disposed as scrap. These types of scrap, called electronic waste, cause serious damage to the environment and livings due to the harmful elements and components. Apart from harmful compounds, the high content of precious metals in e-waste compared to the natural sources makes them very attractive for metal recovery. Print circuit boards (PCB's), which comprise 3% of the e-wastes, attract attention with high Cu, Au and Ag contents. Within the scope of this study, comminution and classification processes were applied and then shaking table was subjected to -2 , + 0.5 and -0.5 mm fractions to recover Cu, Au, Ag from PCB's. As a result of the enrichment tests, 62% wt. of the feed was obtained with 88.2% Au, 95.3% Cu and 93.6% Ag recoveries.

Keywords:

Recovery,
Valuable metals,
Printed circuit boards,
Mineral processing

* Sorumlu yazar / Corresponding author: tanisali@itu.edu.tr, * <https://orcid.org/0000-0003-0894-2185>

** ozermust@itu.edu.tr, * <https://orcid.org/0000-0003-2642-6782>

*** buratf@itu.edu.tr, * <https://orcid.org/0000-0001-7051-0063>

GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte artan müşteri talepleri ile elektrik ve elektronik cihaz üretimi ve satın alma gücüne bağlı olarak tüketim rakamları gün geçtikçe artış göstermektedir. Yeni ürünlerin piyasaya çıkması ile eski elektronik ürünler hurdaya çıkmakta ve elektronik atık olarak depolanmaktadır. Belli bir grup için ömrünü tamamlamış olarak görülen elektronik malzemeler farklı kişilerin ihtiyaçlarını karşılayabilecek nitelikte olabilmektedir. Son kullanıcılarından alınan elektronik atıklar herhangi bir müdahaleye gerek duyulmadan veya basit onarımlarla kullanılabilir durumda ise bütün olarak farklı kullanıcılar tarafından kullanılabilir. Bu durumda elektrikli ve elektronik donanımlar tekrar kullanım yolu ile değerlendirilmiş olmaktadır. Geri dönüşüm, parçanın ömrü tamamlandığında malzemelerin tekrar hammadde olarak üretim sürecine kazandırılabilmesi işlemidir. Malzeme geri kazanım prosesi, elektronik atık geri dönüşümünde en önemli adımdır. Özellikle son yıllarda içerdiği zararlı element ve bileşikler yüzünden elektronik atıklar, çözüm üretilmesi gereken konuların başında yerini almaktadır (Burat ve diğ., 2016; Rao ve diğ., 2017).

Elektrik ve elektronik atıkların %3'ünü oluşturan baskı devre kartları, içerdiği toksik metal ve bileşiklerin yanı sıra Au, Ag, Cu, Pd gibi değerli metalleri bünyesinde barındırmasından dolayı son yıllarda, geri dönüşüm alanında dünya çapında gerçekleştirilen birçok çalışmanın konusu olmaktadır. Baskı devre kartlarının geri dönüşümü ile hem zararlı atıkların doğaya ve canlılara verdiği hasar azaltılmakta hem de yapısında bulunan değerli metaller kazanılabilmektedir. Doğal kaynaklardaki metal içeriğine kıyasla 10-100 kat daha fazla metal içeriğine sahip olması ile baskı devre kartları ikincil kaynak olarak çekici hale gelmiştir. Bu atıkların kullanılması ile birincil kaynakların tüketimi de azaltılarak madencilik üretiminin getirdiği olumsuz etkiler azaltılabilecektir (Cui ve Forssberg, 2003; Castro ve Martins, 2009; Zeng ve diğ., 2012, Burat ve diğ., 2014).

Baskı devre kartlarından metal geri kazanımı konusunda literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar boyut küçültme, fiziksel ve kimyasal analiz, zenginleştirme ve saflaştırma işlemlerini içermektedir. Zenginleştirme işlemleri fiziksel, fizikokimyasal ve kimyasal olarak üçe ayrılmaktadır.

Fiziksel ve fizikokimyasal işlemlerin sonucunda uç ürün elde edebilmek için kimyasal yöntemlere başvurmak zorunludur. Fiziksel ve fizikokimyasal yöntemlerden faydalanarak karmaşık yapı basite indirgenmekte, elde edilen ön konsantre ile istenmeyen bileşenlerin büyük bir çoğunluğu sistemden uzaklaştırılmakta ve bir sonraki kademeye için gerekli olan reaktif miktarı, enerji kullanımı ve bu işlemlerin getirdiği çevresel yük azaltılmış olmaktadır (Madenoglu, 2005; Deveci ve diğ., 2010; Burat ve Özer, 2018; Tanisali ve diğ., 2018).

Ülkemiz elektronik ürünlerde dışa bağımlı olmakta ve bu teknolojiyi satın almaktadır. Bu ürünlerin kullanım ömrü sonlandığında elektronik atıklar hurdacılar tarafından toplanmakta, doğrudan veya basit olarak parçalarına ayrıldıktan ve/veya seçimli olarak yapılan elle ayıklama işlemlerinden sonra yurtdışına gönderilmektedir. Bu atıkların ülkemizde uygun zenginleştirme yöntemleri geliştirilerek geri kazanımın sağlanması için bilimsel ve teknolojik çalışmalara gerek duyulmaktadır. Baskı devre kartlarının karışık yapısı ve çok farklı malzeme bileşenleri ihtiva etmesinden dolayı uygun, basit ve ucuz olan zenginleştirme yöntemleri ile ön konsantre elde etmek amacıyla değerlendirilebilir. Bu nedenlerden dolayı, özgül ağırlık farkına göre ayırma işlemlerinin yapıldığı, basit yapısı, ucuzluğu ve kullanım kolaylığı ile fiziksel zenginleştirme işlemlerinde oldukça sık olarak tercih edilen sarsıntılı masa bu çalışma kapsamında kullanılmış olup, baskı devre kartlarında yüksek içeriklerde bulunan altın, gümüş ve bakır gibi değerli metallerin ön konsantre olarak kazanımı araştırılmıştır.

1. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, farklı bilgisayar üretici firmaları tarafından imal edilmiş ve yararlı kullanım süresi sona eren bilgisayar ana kartları kullanılmıştır. Deneysel çalışmalara esas olan yaklaşık 90 kg ağırlığındaki anakart numuneleri SAY Ramat Ltd. Şti. tarafından temin edilmiştir. İlk olarak, ana kart üzerinde bulunan, boyut küçültme ve zenginleştirme işlemlerinde olumsuzluk yaratabilecek plastik, alüminyum, kapasitör vb. bileşenler elle ayıklanarak uzaklaştırılmıştır (Foto 1).

Zenginleştirmede problem yaratacak bileşenlerin uzaklaştırılmasından sonra, elde edilen BDK numunesi içerisindeki değerli metaller ile çoğunluğunu plastik malzemelerin oluşturduğu metal olmayan fraksiyonun serbestleşmesini sağlamak amacıyla, boyut küçültme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla İTÜ Cevher Hazırlama Müh-

disliği Pilot Tesisinde yer alan kesici (shredder) ve çekiçli kırıcı kullanılarak boyut küçültme işlemleri tamamlanmıştır (Foto 2). Kırıcılara giren baskı devre kartı numuneleri ve kırıcı çıkışlarında elde edilen malzemelerin görsellerine Foto 3'de yer verilmektedir.

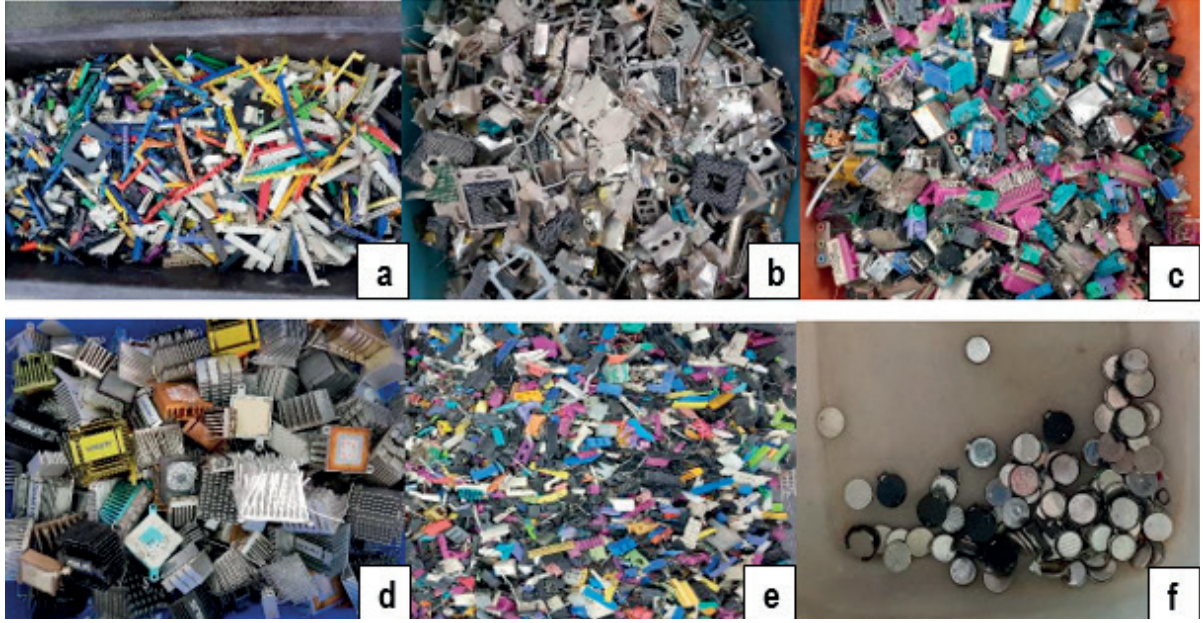


Foto 1. Elle ayıklama işlemi sonucunda ayrılan bileşenler: (a) soket, (b) Al çerçeve, (c) USB girişleri, (d) soğutucu, (e) plastikler, (f) piller

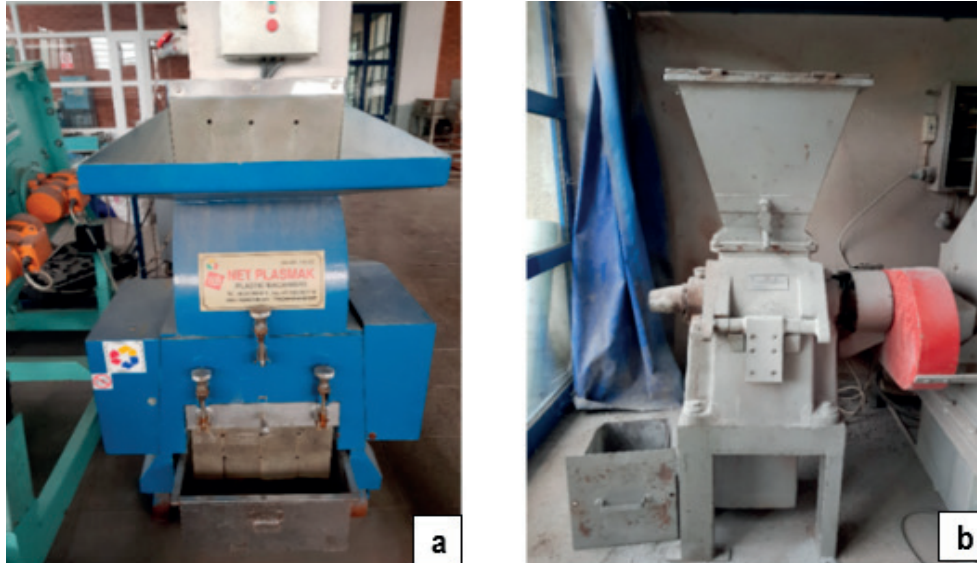


Foto 2. (a) Kesici, (b) Çekiçli kırıcı

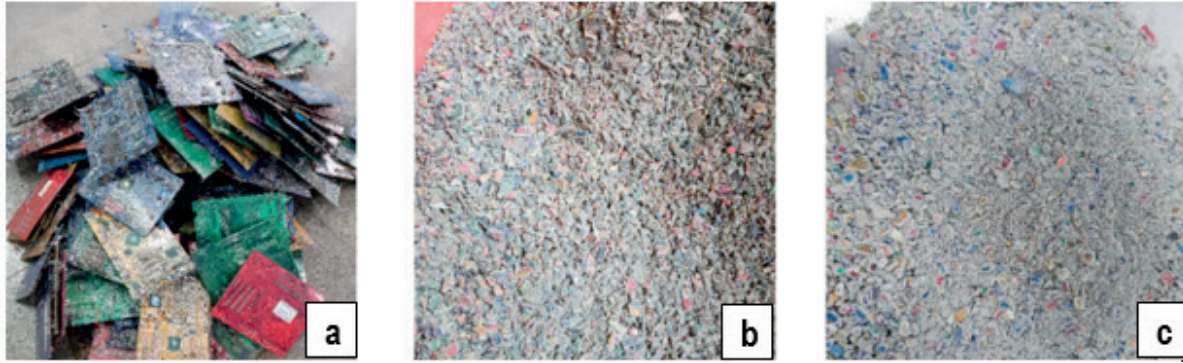
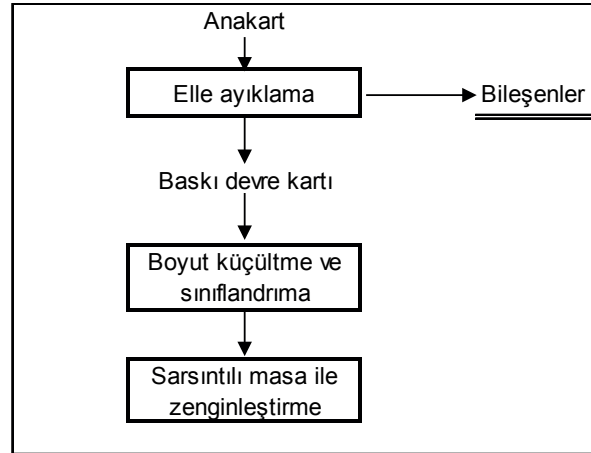


Foto 3. (a) Kırma işlemi öncesi numunesi, (b) birinci kademe kırma işlemi sonrası elde edilen numune, (c) ikinci kademe kırma işlemi sonrası elde edilen numune

Zenginleştirme çalışmalarında kullanılacak malzemeyi uygun tane boyutuna hazırlamak amacıyla, ilk kademe kırma işlemi gerçekleştirildikten sonra 2 mm elek açıklığına sahip elek kullanılarak malzeme iki ayrı boyuta sınıflandırılmıştır. Beslenen malzemenin %23,7'sinin 2 mm altına geçtiği tespit edilmiş ve bu ürünün yüksek oranda serbest metal içerdiği gözlenmiştir. +2 mm boyut grubunun yüksek oranda bağlı tane içermesinden ve zenginleştirme işlemleri için uygun tane serbestleşmesine ulaşamayacağından dolayı, ikinci kademe kırma işleminde çekiçli kırıcı kullanılmış ve malzemenin tane boyutu yaklaşık 0,5 mm'nin altına indirilmiştir. Bu aşamada, 0,5 mm'lik elek kontrol amacıyla kullanılmış olup, sünek yapısından dolayı elek altına geçmeyen taneler elek üzerinde kalmıştır. Elek altında ve üstünde kalan malzemeler, +0,5 mm ve -0,5 mm olarak boyut gruplarına ayrılmıştır.

Bilindiği üzere baskı devre kartı numunesinde metal ve plastik-seramik bileşenler arasında yüksek özgül ağırlık farkı bulunmaktadır. Bu farktan yararlanılarak, kırma ve sınıflandırma işlemleri ile boyut gruplarına ayrılan numuneler (-2 mm metal ağırlıklı malzeme; +0,5 mm ve -0,5 mm) yatay tabaka halinde akan akışkan ortamda özgül ağırlık farkına göre ayırma yapan sarsıntılı masaya beslenmiştir. Sarsıntılı masa ile zenginleştirme yapılmasının temel sebepleri; kullanımının basit, ayırma veriminin yüksek, düşük maliyetli oluşudur. Bu çalışmanın kaba akım şeması Şekil 1'de verilmektedir. Sarsıntılı masa ile yapılan deneylerde koşullar aşağıda verilmektedir:

- Besleme ve yıkama suyu: 0,16 L/sn
- Frekans: 300 ileri-geri /dk
- Genlik: 2 mm
- Eğim: 3°



Şekil 1. Deneysel çalışmalara ait akım şeması

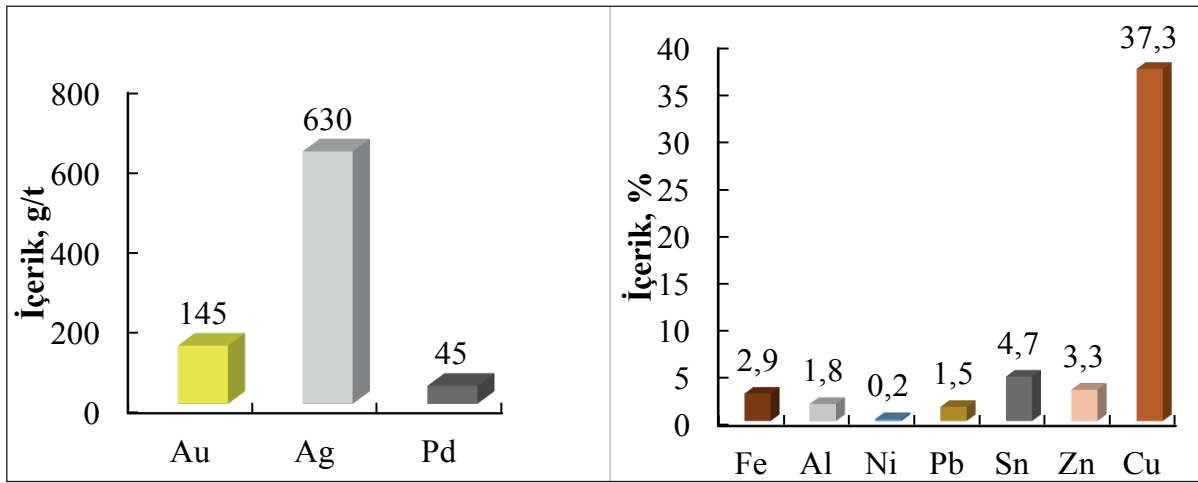
Zenginleştirme işlemleri sonrasında elde edilen ürünlerin metal içeriklerini belirlemek amacıyla temsili numuneler alınmış, akredite analiz firması Argetest'e gönderilmiştir. Au analizi için küpelasyon sonrası kral suyunda çözündürme işleminin ardından atomik adsorpsiyon spektrometri cihazı (Perkin Elmer-Pinnacle 400) kullanılmıştır. Ag ve Cu analizi için kral suyunda çözündürme sonrası atomik adsorpsiyon spektrometresi (Perkin Elmer-Pinnacle 400) kullanılarak metal içerikleri tespit edilmiştir.

2. BULGULAR VE TARTIŞMA

Elle ayıklama ve boyut küçültme işlemlerinden sonrasında elde edilen temsili numunenin metal içerikleri Şekil 2'de gösterilmektedir. BDK numunesinin yaklaşık olarak 160 g/t Au, 740 g/t Ag ve 47 g/t Pd içermektedir. Bu 145 g/t Au, 630 g/t Ag ve 45 g/t Pd değerli metallerin haricinde %37,3 Cu, %4,7 Sn, %3,3 Zn ve %2,9 Fe bulunmaktadır. -2, +0,5 ve -0,5 mm boyut gruplarına sınıflandırılan numuneler kullanılarak yapılan zenginleştirme işlemlerinde metal içeriği yüksek ağır ürünün kazanımı ve düşük metal içerikli hafif ürünün uzaklaştırılması amaçlanmıştır. Hafif ürünler ile birlikte

kaybedilen metalik değerleri kazanmak ve metal kazanma verimini arttırmak amacıyla iki kademeli temizleme işlemi uygulanmıştır.

Foto 4'de görüldüğü üzere sarsıntılı masanın sol tarafından metal içerikleri yüksek ağır ürün elde edilirken, orta bölgesinden bağlı tane ağırlıklı ara ürün ve en sağ tarafından ise çoğunluğu serbest halde bulunan plastik yoğunluklu hafif ürün elde edilmiştir. Yapılan sarsıntılı masa deneyleri sonucunda elde edilen ürünler Au, Ag ve Cu içerik ve kazanma verimlerine göre değerlendirilmiş olup, ayrıntılı sonuçlara Çizelge 1'de, birleştirilmiş sonuçlara ise Çizelge 2'de yer verilmektedir.



Şekil 2. Baskı devre kartı numunesinin metal içerikleri



Foto 4. Sarsıntılı masa üzerinde oluşan bantlar

Çizelge 1. Sarsıntılı masa deneyi sonucunda elde edilen ürünlerin metal içerikleri ve verimleri

Besleme boyutu, mm	Ürünler	Miktar, %	Au		Ag		Cu	
			İ, g/t	V, %	İ, g/t	V, %	İ, %	V, %
-2	Ağır ürün	16,3	160	18,7	689	18,4	61,7	26,8
	Ara ürün	1,8	1169	14,8	562	1,6	43,4	2
	Hafif 3	0,7	802	0,3	318	0,3	29,7	0,5
	Hafif 2	3,2	187	4,2	277	1,4	10,7	0,9
	Hafif 1	1,4	62	7,9	185	0,4	3,8	0,1
	Toplam	23,3	253	42,1	587	22,2	49,8	30,9
+0,5	Ağır 1	25,6	34	6,1	1538	64,4	59,9	40,8
	Ağır 2	3,5	13	0,3	198	1,1	58,9	5,4
	Ara ürün	4,6	7	0,2	42	0,3	32,5	3,9
	Hafif 2	5,1	3	0,1	13	0,1	7,8	1,1
	Hafif 1	3,8	5	0,1	15	0,1	4	0,4
	Toplam	42,6	23	7	949	66	45,5	51,6
-0,5	Ağır ürün	8,2	739	38,5	619	8,3	71,3	15,5
	Ara ürün	2	318	9,3	124	0,4	20,4	1,1
	Hafif 2	7,1	23	1,1	37	0,9	1,3	0,2
	Hafif 1	7,7	12	0,6	68	0,4	1,1	0,2
	Şlam	9,1	20	1,3	122	1,8	1,9	0,5
	Toplam	34,1	209	50,9	212	11,8	19,3	17,5
TOPLAM		100	140	100	613	100	37,6	100

(İ: içerik, V: verim)

Çizelge 2. Sarsıntılı masa deneylerinin birleştirilmiş sonuçları

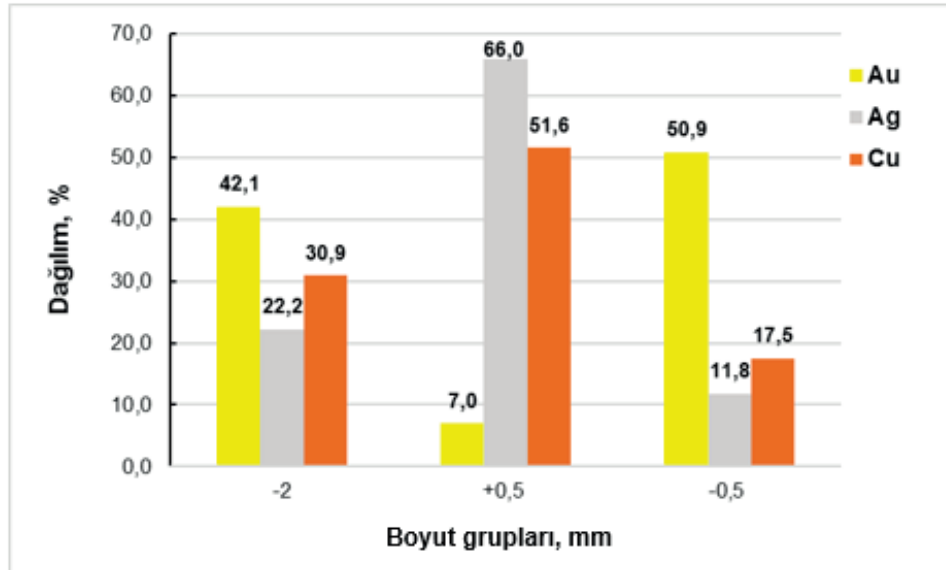
Besleme boyutu, mm	Ürünler	Miktar, %	Au		Ag		Cu	
			İ, g/t	V, %	İ, g/t	V, %	İ, %	V, %
-2	Konsantre	18,1	259	33,5	677	20	59,9	28,8
	Artık	5,2	231	8,6	276	2,2	14,9	2,1
	Toplam	23,3	253	42,1	587	22,2	49,8	30,9
+0,5	Konsantre	33,6	28	6,9	1198	65,7	56,1	50,2
	Artık	8,9	2	0,1	14	0,2	5,6	1,3
	Toplam	42,6	23	7	949	66	45,5	51,6
-0,5	Konsantre	10,2	657	47,8	522	8,7	61,4	16,6
	Artık	23,9	18	3,1	79	3,1	1,5	0,9
	Toplam	34,1	209	50,9	212	11,8	19,3	17,5
TOPLAM		100	140	100	613	100	37,6	100

(İ: içerik, V:verim)

Au, Ag ve Cu'nun farklı boyut gruplarındaki metal dağılımları Şekil 3'de gösterilmektedir. İlk kademede kırma sonucu 2 mm altına geçen malzemedeki Au'nun yaklaşık %42,1'i bu boyut grubunda bulunmaktadır. Beslenen malzemedeki altının ağırlıkça %50,9'u öğütme ve sınıflandırma işlemleri sonucunda 0,5 mm'nin altına geçmiştir. +0,5 mm boyut grubunda ise bu oran yalnızca %7'dir. Ag'nin farklı boyut gruplarındaki dağılımı incelendiğinde ağırlıkça %66'sının +0,5 mm boyut grubunda ve bağlı tane olarak bulunduğu, %22,2 oranında Ag'nin ise ilk kademe kırma sonucunda 2 mm elek açıklığına sahip elek ile yapılan sınıflandırma işlemleri sonucu -2 mm boyut grubunda yoğunlaştığı görülmektedir. Geriye kalan ağırlıkça

%11,8 oranındaki gümüş 0,5 mm altına geçmiştir. Bakır'ın dağılımı gümüşe benzerlik göstermekte olup, +0,5 mm boyut grubundaki dağılım oranı %50,6 olarak görülmektedir. 2 mm altındaki boyutta %30,9, 0,5 mm altında ise bu oran %17,5'e düşmektedir. Çizelge 3'de üç boyut grubundan elde edilen toplam konsantre ve atıkların miktar, içerik ve verimlerine yer verilmektedir. Burada verilen birleştirilmiş sonuçlara göre %88 Au, %94 Ag ve %96 Cu verimleri ile büyük oranda plastik ve seramik malzemeden ayrılmış bir ön konsantrenin üretimi mümkün görülmektedir.

Foto 5'de -2 mm boyut grubu ile yapılan sarsıntılı masa deneyleri sonucu elde edilen konsantre, ara ürün ve artık ürünleri görülmektedir.



Şekil 3. Au, Ag ve Cu'nun farklı boyut gruplarındaki dağılımı

Çizelge 3. Nihai konsantre ve atıkların birleştirilmiş sonuçları

Ürünler	Miktar, %	Au		Ag		Cu	
		İçerik, g/t	Verim, %	İçerik, g/t	Verim, %	İçerik, %	Verim, %
Konsantre	62	199	88,2	934	93,6	58	95,3
Artık	38	43	11,8	91	5,4	4	4,7
Toplam	100	140	100	613	100	38	100



Foto 5. Zenginleştirme işlemleri sonucunda elde edilen ürünler (-2 mm metal ağırlıklı ürün)

Ağır üründe bakır kablo ve diğer metal ve alaşımlar gözle görülür biçimde ayırt edilmekte olup, bu ürünlerdeki plastik içeriği oldukça düşüktür. Çizelge 1'de verilen sonuçlara göre, ağır ürün içerisindeki bakır içeriği %61,7'ye kadar yükselmektedir. Bununla birlikte ara ürün %43,4 Cu içermektedir. Hafif 1, hafif 2 ve hafif 3 sırasıyla, %29,7; %10,7 ve %3,8 Cu içeriği ile alınmıştır. Hafif ürünlerdeki bakır kaybının nedeni bu boyut grubunda plastikler ile bağlı tane olarak bulunması ve hafif ürün ile birlikte kaybedilmesidir. Cu dağılımı incelendiğinde ise ağırlıkça beslenen malzemenin % 86,7'si ağır ürün, % 6,6'sı ara ürün ve %6,7'si hafif üründen alınmaktadır. Deneye göre beslenen malzeme altının ağırlıkça %72,8'i ağır ve ara ürüne dağılırken, %27,2'si hafif üründe kalmıştır. Ağır ve ara ürünün birleştirilmesi ile elde edilen ürünün Au içeriği ise 613 g/t olarak hesap edilmektedir. Hafif 3 olarak adlandırılan ürünün Au içeriği bağlı

tane oluşumundan kaynaklı olarak 802 g/t'a kadar yükselmektedir. Plastik içeriği yoğun ve hafif 1 olarak adlandırılan üründe Au içeriği 62 g/t'a kadar inerken, hafif 2'deki Au içeriği 187 g/t olarak bulunmaktadır. Gümüş ise 689 g/t içerik ve %82,8 verimle ağır üründe alınırken, ara üründe 562 g/t'ye düşmektedir. Hafif ürünle birlikte kaybedilen gümüş miktarı %10,9'dur ve ortalama olarak 243 g/t Ag içeriğine sahiptir. - 2 mm boyut grubunda yapılan sarsıntılı masa deneylerinde hafif ürünlerde özellikle Au ve Ag metal kayıplarının yüksek olması ve beslenen malzemenin %49,8 Cu, 253 g/t Au ve 587 g/t Ag içermesinden dolayı bu boyut grubunun zenginleştirme işlemine tabi tutulmadan bu haliyle satılabilir bir ürün olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir. +0,5 mm boyut grubundaki numune kullanılarak yapılan sarsıntılı masa deneyleri sonucunda elde edilen ürünlerin görselleri Foto 6'da verilmektedir.

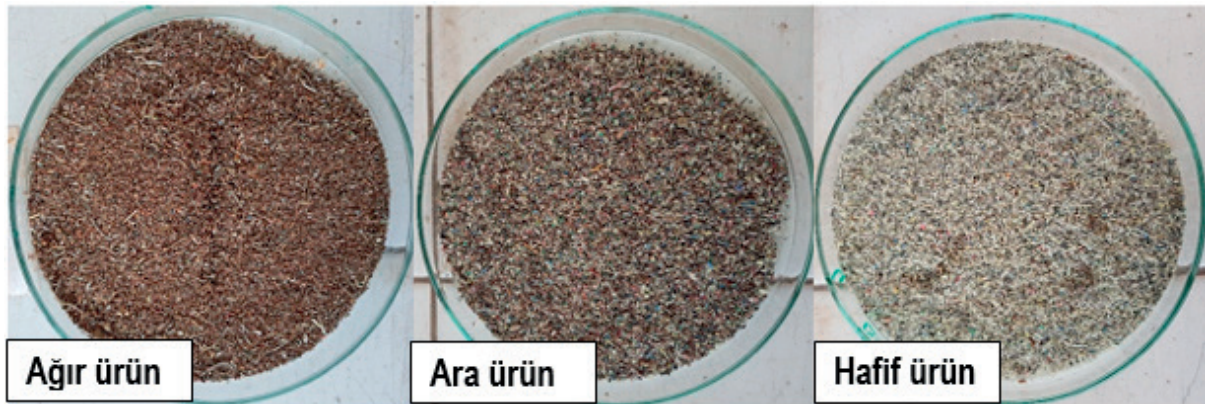


Foto 6. +0,5 mm boyut grubunda elde edilen sarsıntılı masa ürünleri

Deneye göre beslenen malzemedeki metalik bakırın %89,8'i, ağır 1 ve ağır 2 ürünleri içerisinde kazanılmıştır. Bu miktar ara üründe %7,6, hafif ürünler birleştirildiğinde ise %2,6 olarak bulunmaktadır. Çizelge 2'de görüldüğü üzere ağır 1 ve ağır 2 ürünlerinin bakır içerikleri birbirine çok yakın olup, bu ürünlerin birleştirilmesi sonucunda yaklaşık %59 Cu içerikli bir konsantre elde edilebilmektedir. Ara ürünün miktarca az olması ve nispeten yüksek bakır içermesinden (%32,7) dolayı ağır ürünler ile birleştirilip % 56,8 Cu içeriği ile satılabilir nitelikte bir ürün eldesi mümkündür. Geride kalan %5,6 Cu içeriğine sahip ürün ise hidrometalurjik yöntemler kullanılarak kazanılabilir. Deneye göre beslenen malzemedeki altının %93,6'sı ağır 1 ve 2 ile elde edilebilmektedir. Bu oran ara ürün ve hafif ürünler için sırasıyla %3,1 ve %3,4 olarak bulunmuştur. Ağır ürünler ve ara

ürünün birleşmesi elde edilecek konsantrenin Au içeriği yaklaşık 28 g/t'dur. Hafif ürünler birleştirildiğinde ise Au içeriği 3,8 g/t olarak hesaplanmaktadır. Bu içeriği ile elde edilen artık ürün işletilebilir doğal kaynaklara çok yakındır. +0,5 mm boyut grubunda yapılan masa deneyleri sonucunda 1538 g/t Ag içeriği ve %97,5 kazanma verimi ile bir ağır ürün elde edilebilmektedir. Ağır 1, ağır 2 ve araürün birleştirildiği takdirde ortalama 1198 g/t Ag içerikli bir konsantre %99,7 verimle kazanılabilmektedir. Çizelge 3'deki sonuçlar göre hafif ürünlerin toplam gümüş içeriği 14 g/t olarak hesaplanırken, metal kaybının yaklaşık %0,2 olduğu görülmektedir. Tane serbestleşmesinin en yüksek olduğu -0,5 mm boyut grubunda yapılan zenginleştirme işlemleri sonucunda elde edilen ürünlerin görselleri Foto 7'de verilmektedir.



Foto 7. -0,5 mm boyut grubunda elde edilen sarsıntılı masa ürünleri

-0,5 mm boyut grubunda yapılan masa deneyleri sonucunda beslenen malzemede bulunan bakırın %88,5'i ağır üründen %71,3 Cu içeriği ile elde edilmiştir. Araürünün Cu içeriği (%20,4) oldukça yüksektir. Ağır ürün ile birleştirildiğinde ise ortalama %61,3 Cu içeriğine sahip bir konsantre elde edilmektedir. Hafif ürünler ve şlam birleştiği takdirde ortalama Cu içeriği %1,5 olarak bulunmakta ve metalik bakır %5,4 oranında kaybedilmektedir.

-0,5 mm boyut grubunda yapılan masa deneyleri sonucunda beslenen malzemede bulunan altının %76'sı ağır üründen 739 g/t içerik ile elde edilmiştir. Metalik altın %18,3'ü oranında ara üründe ve toplam %5,8 oranında hafif ürünler ve şlamın birleştirilmesi ile elde edilen artık üründe kalmaktadır. Çizelge 2'de görüldüğü üzere ara ürünün Au içeriği 318 g/t'dur. Yüksek Au içerikli bu araürün

miktarca da az olması göz önünde bulundurularak, ağır ürün ile birleştirildiğinde ortalama 657 g/t Au içeriğine sahip bir konsantre üretilebilir. Hafif ürünler ve şlam ile birlikte ortalama olarak 18 g/t Au içerikli bir ürün kaybedilmektedir. -0,5 mm boyut grubunda yapılan masa deneyleri sonucunda beslenen malzemede bulunan gümüşün %70,2'si ağır üründen 619 g/t Ag içeriği ile elde edilmiştir. Metalik gümüşün %3,4'ü araüründe, %11'i hafif ürünlerde ve %15,4'ü şlam ile hareket etmektedir.

Çizelge 1'de görüldüğü üzere ara ürünün Ag içeriği ortalama 123 g/t'dur. Bu ürünün miktarca da az oluşu göz önünde bulundurularak ağır ürün ile birleştirilerek 513 g/t Ag içeriğine sahip bir nihai konsantre elde edilebilir. Hafif ürünlerin ortalama Ag içeriği 53 g/t, şlamın ise 122 g/t'dur. Hafif ürünler ile kaybedilen Au, Ag ve Cu'nun kazanımı

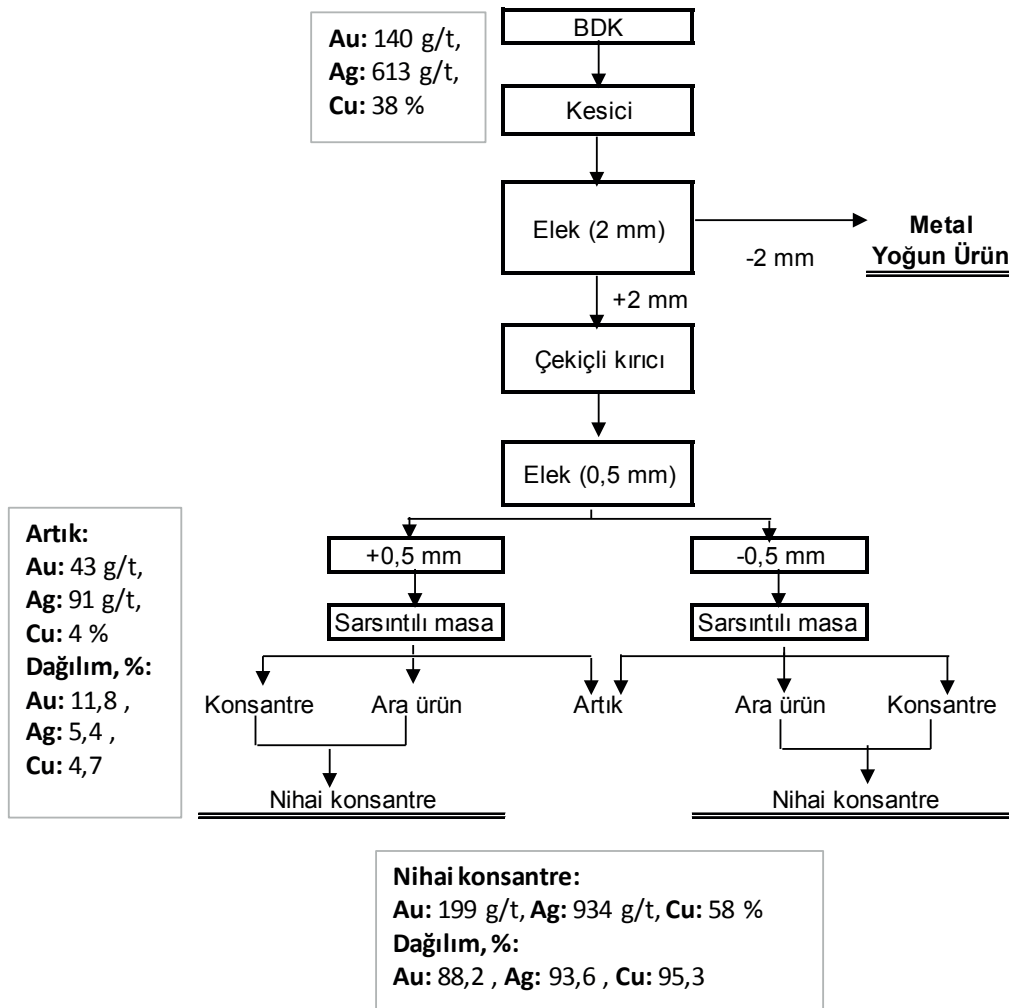
için flotasyon yöntemine başvurulabilir. Yapılan sarsıntılı masa çalışmaları sonucunda elde edilen akım şemasına Şekil 4’de yer verilmektedir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İlk kademe kırma işlemi ve ardından 2 mm elek açıklığına sahip elek kullanılarak yapılan sınıflandırma işlemi ile beslenen malzemenin %23,3’ü oranında -2 mm altına geçen bir ürün herhangi bir zenginleştirme işlemi uygulanmadan %49,8 Cu, 253 g/t Au ve 587 g/t Ag içeriği ile satılabilir bir ürün olarak elde edilebilmektedir.

İkinci kademe kırma işleminden sonra +0,5 ve -0,5 mm boyut gruplarına sınıflandırılan numunelere özgül ağırlık farkına göre ayırma yapan sarsıntılı masa zenginleştirme işlemi uygulanmıştır. +0,5 mm boyut grubunda zenginleştirme işlemi sonu-

cu %56,1 Cu, 1198 g/t Ag ve 28 g/t Au içeriklerine sahip bir konsantre sırasıyla %97, %99,5 ve %98,5 kazanma verimle elde edilmektedir. -0,5 mm boyut grubunda yapılan sarsıntılı masa ile zenginleştirme işlemleri sonucunda % 61,4 Cu, 522 g/t Ag ve 657 g/t Au içerikli bir konsantre %95, Au %94 ve Ag %77 kazanma verimleri ile üretilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan boyut küçültme, sınıflandırma ve fiziksel zenginleştirme işlemleri ile yüksek içerik ve verimlere sahip ön konsantrelerin üretimi mümkün olmuştur. Üç farklı boyut grubuna yapılan sarsıntılı masa ile zenginleştirme işlemleri sonucunda beslenen malzemenin %62’si konsantre ürün olarak elde edilmiştir. Toplam konsantrede Au 199 g/t içerik ve %88,2 metal kazanma verimi ile, Cu % 58 içerik ve %95,3 verim ile ve 934 g/t içerikli Ag %93,6 verim ile elde edilmiştir.



Şekil 4. Nihai akım şeması

Beslenen malzemeye göre ağırlıkça %38 oranında bir artık %4 Cu, 91 g/t Ag ve 43 g/t Au içerikleri ile ayrılmıştır. Bu kaçakların büyük çoğunluğunun bağlı tane olarak plastikte birlikte hareket eden metallere kaynaklandığı bilinmektedir. Bu sebeple artıktaki kalan metallere kazanılması için çok daha ince boyutlarda öğütme işlemleri uygulanarak, flotasyon ve santrifüj ayırma gibi daha ince boyutlarda zenginleştirmenin yapıldığı yöntemler tercih edilmelidir.

Uygulanan fiziksel zenginleştirme işlemleri sayesinde bir sonraki kademe olan metalurjik yöntemler için daha basit bir yapı oluşturulabilir, böylelikle kapasite, reaktif sarfiyatı ve enerji tüketimi açısından daha ekonomik ve çevreci bir sürecin tasarlanabilmesi mümkün olabilmektedir. Gelişmiş ülkelerde oldukça yaygın olan ikincil kaynaklardan metal geri kazanımında başlangıç seviyesinde olan ülkemizde yapılan işlem, baskı devre kartlarının toplanarak satılması ile sınırlı kalmaktadır. Baskı devre kartlarının oldukça kolay ve ekonomik olan cevher hazırlama ve zenginleştirme yöntemleri ile katma değeri yüksek bir ürüne dönüştürülmesi mümkündür. Bu anlamda yapılacak çalışmaların desteklenerek ülke ekonomisine katkı sağlayacak ürünlerin elde edilmesi gerekmektedir. Böylelikle elektronik atık kapsamında nitelendirilen bu kaynaklar değerlendirilerek hem çevreye verdikleri zarar azaltılacak hem de içerisindeki değerli metallere kazanılması ile ekonomik katkı sağlanmış olacak ve doğal kaynaklar korunacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri (Proje-MGA-2017-40580 ve MYL-2018-41528) biriminin desteği ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numune temini konusunda yardımlarını esirgemeyen. SAY Ramat Kuyumculuk Şti. Ltd.' ye teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Burat, F., Ozer, M., 2018. Physical Separation Route for Printed Circuit Boards (PCBs). *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 54 (2), 554-566.

Burat, F., Özer, M., Arslan, F., 2016. Elektronik Atık Kapsamındaki Baskı Devre Kartlarının Karakterizasyonu. 8. Ulusal Katı Yönetimi Kongresi (UKAY), Kastamonu, 11-14 Mayıs.

Burat, F., Özer, M., Arslan, F., 2016. Pre-concentration of Precious Metals from Waste Printed Circuit Boards (PCBs). *Water, Waste and Energy Management*, 18-20 July, Rome, Italy.

Burat, F., Özer, M., Arslan, F., 2014. Characterization of Printed Circuit Main Boards Prior To Separation of Precious Metals. *Industrial Hazardous Waste management Congress, Crete 2014*, 2-6 September 2014, Crete, Greece.

Castro, L., H.Martins, A., 2009. Recovery of Tin and Copper by Recycling of Printed Circuit Boards From Obsolete Computers. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 649-657.

Cui, J., Forssberg, E., 2003. Mechanical Recycling of Waste Electric and Electronic Equipment: A Review. *Journal of Hazardous Materials*, 243-263.

Deveci, H., Yazıcı, E., Aydın, U., Yazıcı, R., Akçıl, A., 2010. Extraction of Copper From Scrap TV Boards by Sulphuric Acid Leaching Under Oxidising Conditions. In: *Proceedings of Going Green-Care Innovation 2010 Conference*, 45, Vienna.

Madenoglu, H., 2005. Recovery of Some Metals from Electronic Scrap. *Ege Üniversitesi, Kimya Mühendisliği*.

Rao, M., Sultana, R., Kota, S. H., 2017. Chapter 6 - Electronic Waste. *Solid and Hazardous Waste Management*, 209-242.

Tanısalı, E., Özer, M., Burat, F., 2018. An Overview on Physical and Physico-Chemical Beneficiation Studies Conducted for Metal Recovery from PCBs. *15th International Mineral Processing Symposium, Antalya-Turkey*, 341-346.

Zeng, X., Zheng, L., Xie, H., Lu, B., Xia, K., Chao, K., Lia, J., 2012. Current Status and Future Perspective of Waste Printed Circuit. *The Seventh International Conference on Waste Management and Technology*, s. 590-597.